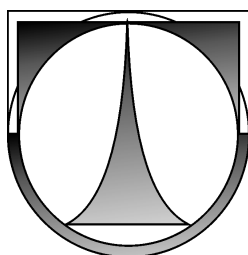


# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ  
Katedra vozidel a motorů



## Diplomová práce

Osobní automobil s motorem na zkapalněný vodík

Car powered by liquefied - hydrogen engine

2007

Martin Bukvička

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA STROJNÍ**

**Katedra vozidel a motorů**

**Obor 2302T010**

**Konstrukce strojů a zařízení**

**Zaměření**

**Kolové dopravní a manipulační stroje**

**Osobní automobil s motorem na zkapalněný vodík**

**Car powered by liquefied - hydrogen engine**

**Diplomová práce**

**KVM – DP – 527**

**Martin Bukvička**

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Josef Laurin, CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Josef Šuma, Chart Ferox, a.s.

Počet stran : 52

Počet obrázků : 32

Počet příloh : 4

Počet výkresů : 5

Datum odevzdání: 25. 5. 2007

## ANOTACE

Cílem diplomové práce je zpracovat projekt přestavby osobního automobilu Škoda s benzínovým motorem na pohon zkapalněným vodíkem. Práce je zaměřena na zástavbu kryogenní nádrže ve vozidle, vypracování výkresové dokumentace. Dále pak popisuje způsob odpařování a regulace vodíku na tlak 100 barů na vstupu do motoru. V závěru jsou uvedeny potřebné bezpečnostní parametry palivové instalace v automobilu s motorem na LH<sub>2</sub>.

**Klíčová slova:** vodík - zkapalněný, kryogenní nádrž, LH<sub>2</sub>, Škoda Octavia, výměník

## ANNOTATION

The objective this graduation theses is elaboration of project associated with conversion Škoda car fuelled by internal combustion engine to liquefied - hydrogen engine. The labour is focused on development of kryogenic container in a vehicle and design documentation. In the following it describes method of vaporization and regulation of hydrogen to pressure 100 Bars on the engine's entry. On the final sequence there are introduced safety parameters of this fuel installation in the car with LH<sub>2</sub> - driven engine.

**Key words:** liquefied - hydrogen, kryogenic container, LH<sub>2</sub>, Škoda Octavia, exchanger

# **PROHLÁŠENÍ K VYUŽÍVÁNÍ VÝSLEDKŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Mladé Boleslavi, 25. 5. 2007

.....

podpis



## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych zde poděkoval doc. Ing. Josefu Laurinovi, CSc. a konzultantu Ing. Josefu Šumovi z firmy Chart Ferox, a.s. za ochotu, trpělivost a celou řadu cenných rad při tvorbě mé diplomové práce. Velký dík patří také prof. Ing. Janu Honcům, CSc. za odbornou pomoc.



## OBSAH DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>13</b>
<b>2. VODÍKOVÝ POHON .....</b>	<b>14</b>
2.1 Fyzikální vlastnosti vodíku .....	14
2.2 Vodík jako palivo pro zážehový motor.....	14
2.3 Emise vznikající při spalování vodíku.....	14
2.4 Budoucnost, výhody a nevýhody LH <sub>2</sub> .....	15
2.5 Způsoby uskladnění vodíku .....	15
2.5.1 Skladování vodíku v plynném skupenství .....	15
2.5.2 Skladování vodíku v kapalném skupenství.....	16
2.5.3 Skladování vodíku v hydridech kovů .....	17
2.5.4 Další metody skladování vodíku.....	18
2.6 Porovnání hmotností paliv a jejich zásobníků .....	18
2.7 V současnosti jezdící automobily na LH <sub>2</sub> .....	19
2.7.1 BMW Hydrogen 7 .....	19
<b>3. PODMÍNKY PŘESTAVBY OSOBNÍHO AUTOMOBILU NA LH<sub>2</sub>.....</b>	<b>21</b>
3.1 Příslušné normy .....	21
3.2 Způsoby regulace a odpařování vodíku .....	22
3.2.1 Nízkotlaká nádoba s dvojitou tlakovou cestou.....	22
3.2.2 Nízkotlaká nádoba s kompresorem.....	23
3.2.3 Vysokotlaká nádoba.....	24
<b>4. AUTOMOBIL ŠKODA OCTAVIA 1,4 MPI .....</b>	<b>25</b>
4.1 Technická data .....	25
4.2 Základní rozměry .....	27
4.3 Otáčková charakteristika motoru .....	27
4.4 Dojezd vozidla .....	28
<b>5. ZÁSTAVBA KRYOGENNÍ NÁDRŽE DO AUTOMOBILU .....</b>	<b>28</b>
5.1 Parametry kryogenní nádrže .....	28



5.1.1	Síly působící na nádrž .....	29
5.2	Konstrukce rámu k upevnění nádrže .....	29
5.2.1	Výpočty ohledně připevnění rámu k podlaze .....	31
5.3	Způsob připevnění nádrže k rámu .....	33
5.3.1	Výpočty související s připevněním nádrže k rámu .....	35
5.4	Umístění nádrže s rámem do vozidla.....	37
5.5	Analýza rámu .....	38
5.5.1	Model, okrajové podmínky .....	38
5.5.2	Výsledky .....	38
<b>6.</b>	<b>ODPAŘOVÁNÍ VODÍKU .....</b>	<b>39</b>
6.1	Výběr varianty uskladnění a odpařování vodíku .....	39
6.1.1	Schéma systému odpařování a regulace .....	40
6.1.2	Popis kryogenní nádrže, systému odpařování a regulace .....	40
6.2	Výpočty armatur, systému odpařování a výměníku .....	41
6.2.1	Průtok vodíku.....	41
6.2.2	Průměry potrubí .....	42
6.2.3	Potřebný výkon na ohřátí vodíku.....	43
6.2.4	Návrh výměníku tepla.....	43
6.2.4.1	Součinitel přestupu tepla vodíku.....	44
6.2.4.2	Součinitel přestupu tepla vody.....	45
6.2.4.3	Součinitel prostupu tepla výměníku .....	46
6.2.4.4	Rozměry výměníku .....	47
<b>7.</b>	<b>BEZPEČNOSTNÍ PARAMETRY .....</b>	<b>48</b>
7.1	Bezpečnost používání vodíku .....	48
7.2	Vlastnosti vodíku při provozu.....	48
7.3	Bezpečnost kryogenní nádrže a palivové instalace.....	49
7.4	Bezpečnostní opatření při práci s vodíkem.....	50
<b>8.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>51</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>52</b>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

### Zkratky

<b>LH<sub>2</sub></b>	<b>Liquid Hydrogen</b> (kapalný vodík)
<b>BMS</b>	<b>Boil - off Management System</b> (odpařovací systém řízení)
<b>HCU</b>	<b>Hydrogen Control Unit</b> (vodíková řídicí jednotka)
<b>IEC</b>	<b>International Electrotechnical Commission</b> (mezinárodní elektrotechnická komise)

### Symboly

<b>Značka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Název</b>
<b>D</b>	<b>[mm]</b>	průměr nádrže
<b>D<sub>1</sub></b>	<b>[mm]</b>	průměr potrubí na výstupu z nádrže
<b>D<sub>2</sub></b>	<b>[mm]</b>	průměr potrubí za výměníkem
<b>D<sub>u</sub></b>	<b>[mm]</b>	vnější průměr trubice ve výměníku
<b>D<sub>vý</sub></b>	<b>[mm]</b>	roztečný průměr trubice ve výměníku
<b>F<sub>N</sub></b>	<b>[N]</b>	předpětí ocelového pásu
<b>F<sub>Q</sub></b>	<b>[N]</b>	předpětí šroubů
<b>F<sub>b</sub></b>	<b>[N]</b>	síla na nádrž v bočním směru
<b>F<sub>p</sub></b>	<b>[N]</b>	síla na nádrž v podélném směru
<b>F<sub>t</sub></b>	<b>[N]</b>	třecí síla mezi podlahou a rámem
<b>F<sub>tb</sub></b>	<b>[N]</b>	boční třecí síla
<b>F', F'', F'''</b>	<b>[N]</b>	síly na jednotlivé šrouby
<b>ΔF<sub>2</sub>', ΔF<sub>2</sub>'', ΔF<sub>2</sub>'''</b>	<b>[N]</b>	snížení jednotlivých sil v sevřených částech
<b>F<sub>2</sub>'</b>	<b>[N]</b>	síla na šroub od sevřené části
<b>K</b>	<b>[W/m<sup>2</sup>K]</b>	souč. prostupu tepla výměníku
<b>M<sub>u</sub></b>	<b>[Nmm]</b>	utahovací moment
<b>N<sub>u</sub></b>	<b>[-]</b>	Nusseltovo číslo
<b>P'</b>	<b>[kW]</b>	výkon v palivu
<b>P<sub>ch</sub></b>	<b>[kW]</b>	výkon chlazený chladičem
<b>P<sub>r</sub></b>	<b>[-]</b>	Prandtlovo číslo
<b>Q<sub>b</sub></b>	<b>[MJ/kg]</b>	výhřevnost benzínu

$Q_1$	[W]	výkon potřebný na odpařování vodíku v nádrži
$Q_2$	[W]	výkon potřebný na ohřátí vodíku ve výměníku
$Q_{LH2}$	[MJ/kg]	výhřevnost vodíku
$Re$	[-]	Reynoldsovo číslo
$Re_p$	[MPa]	mez kluzu ocelového pásu
$Re_s$	[MPa]	mez kluzu šroubu
$S_j$	[mm <sup>2</sup> ]	výpočtový průřez šroubu
$S_p$	[mm <sup>2</sup> ]	plocha podélné podložky pod nádrží
$S_v$	[mm <sup>2</sup> ]	střední průřez výměníkem, kde proudí voda
$S_{vy}$	[m <sup>2</sup> ]	plocha trubice výměníku
$T_1$	[K]	teplota vodíku na výstupu z nádrže
$T_2$	[K]	teplota vodíku za výměníkem
$T_s$	[K]	střední teplota vodíku ve výměníku
$T_{st}$	[K]	střední teplota stěny trubky ve výměníku
$V$	[l]	objem nádrže
$V_b$	[l]	objem benzínu
$V_{ben}$	[l]	objem benzínové nádrže
$V'$	[l]	množství vodíku v nádrži
$V_{100}$	[l/100km]	spotřeba benzínu na 100km
$\dot{V}_1$	[m <sup>3</sup> /s]	objemový průtok vodíku na výstupu z nádrže
$\dot{V}_2$	[m <sup>3</sup> /s]	objemový průtok vodíku za výměníkem
$a, b, c$	[mm]	rozteče šroubů
$c_p$	[N/mm]	tuhost příruby
$c_{pH2}$	[kJ/kgK]	měrná tepelná kapacita vodíku
$c_{pvo}$	[kJ/kgK]	měrná tepelná kapacita vody ve výměníku
$c_{pch}$	[J/kgK]	měrná tepelná kapacita vody v chladiči
$c_s$	[N/mm]	tuhost šroubu
$d_2$	[mm]	střední průměr šroubu
$d_3$	[mm]	malý průměr šroubu
$d_{stř}$	[mm]	střední průměr trubice výměníku
$e$	[mm]	šířka ocelového pásu
$f$	[-]	souč. smykového tření v závitě
$f_0$	[-]	souč. smykového tření mezi podlahou a rámem
$f_p$	[-]	souč. smyk. tření mezi nádrží a pryžovými pásy
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	gravitační zrychlení

<b>h</b>	<b>[mm]</b>	výška těžiště nádrže
<b>h<sub>H2</sub></b>	<b>[kJ/kg]</b>	skupenské teplo varu vodíku
<b>k<sub>p</sub></b>	<b>[-]</b>	bezpečnost ocelového pásu
<b>k<sub>š</sub></b>	<b>[-]</b>	bezpečnost šroubů
<b>k<sub>vý</sub></b>	<b>[-]</b>	souč. bezpečnosti výměníku
<b>l<sub>t</sub></b>	<b>[m]</b>	délka trubice výměníku
<b>l<sub>n</sub></b>	<b>[mm]</b>	délka nádrže
<b>l<sub>vý</sub></b>	<b>[mm]</b>	délka výměníku
<b>m</b>	<b>[kg]</b>	hmotnost prázdné nádrže
<b>m'</b>	<b>[kg]</b>	hmotnost plné nádrže
<b>m<sub>ch</sub></b>	<b>[kg/h]</b>	hmotnostní průtok vodíku
<b>m<sub>ch</sub></b>	<b>[kg/s]</b>	hmotnostní průtok vody chladičem
<b>m<sub>v</sub></b>	<b>[kg/s]</b>	hmotnostní průtok vody výměníkem
<b>m<sub>LH2</sub></b>	<b>[kg]</b>	hmotnost kapalného vodíku
<b>n</b>	<b>[-]</b>	počet závitů výměníku
<b>p</b>	<b>[MPa]</b>	tlak vodíku na výstupu z nádrže
<b>p<sub>p1</sub></b>	<b>[MPa]</b>	tlak působící na nádrž od ocelových pásů
<b>p<sub>p2</sub></b>	<b>[MPa]</b>	tlak působící na nádrž od podélných podložek
<b>q</b>	<b>[W/m]</b>	tepelný tok výměníkem
<b>r</b>	<b>[kJ/kg.K]</b>	měrná plynová konstanta vodíku
<b>s</b>	<b>[mm]</b>	tloušťka stěny trubice výměníku
<b>s<sub>š</sub></b>	<b>[mm]</b>	stoupání šroubu
<b>s<sub>ben</sub></b>	<b>[km]</b>	dojezd na benzín
<b>s<sub>LH2</sub></b>	<b>[km]</b>	dojezd na vodík
<b>t</b>	<b>[mm]</b>	tloušťka ocelového pásu
<b>t<sub>1H2</sub></b>	<b>[°C]</b>	teplota vodíku vstupující do výměníku
<b>t<sub>2H2</sub></b>	<b>[°C]</b>	teplota vodíku vystupující z výměníku
<b>t<sub>1vo</sub></b>	<b>[°C]</b>	teplota vody vstupující do výměníku
<b>t<sub>2vo</sub></b>	<b>[°C]</b>	teplota vody vystupující z výměníku
<b>t<sub>ch1</sub></b>	<b>[°C]</b>	teplota vody vstupující do chladiče
<b>t<sub>ch2</sub></b>	<b>[°C]</b>	teplota vody vystupující z chladiče
<b>t<sub>s1</sub></b>	<b>[°C]</b>	teplota vnitřní stěny výměníku
<b>t<sub>s2</sub></b>	<b>[°C]</b>	teplota vnější stěny výměníku
<b>Δt<sub>ch</sub></b>	<b>[°C]</b>	rozdíl teplot v chladiči
<b>t<sub>v</sub></b>	<b>[°C]</b>	střední teplota vody ve výměníku



$\Delta t$	[°C]	rozdíl teplot vodíku před a za výměníkem
$\Delta \bar{t}$	[°C]	tepelný spád výměníku
$v_1$	[m <sup>3</sup> /kg]	měrný objem vodíku na výstupu z nádrže
$v_2$	[m <sup>3</sup> /kg]	měrný objem vodíku za výměníkem
$w_{LH2}$	[m/s]	rychlost proudění vodíku v potrubí
$w_v$	[m/s]	rychlost proudění vody ve výměníku
$w_{H2}$	[m/s]	střední rychlost proudění vodíku ve výměníku
$\alpha_1$	[°]	polovina úhlu závitu šroubu
$\alpha_{v0}$	[W/m <sup>2</sup> K]	souč. přestupu tepla vody
$\alpha_{H2}$	[W/m <sup>2</sup> K]	souč. přestupu tepla vodíku
$\gamma$	[°]	úhel stoupání šroubu
$\varphi'$	[°]	třecí úhel šroubu
$\nu_{H2}$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematická viskozita vodíku
$\nu_{v0}$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematická viskozita vody
$\lambda_{H2}$	[W/mK]	tepelná vodivost vodíku
$\lambda_m$	[W/mK]	tepelná vodivost mědi
$\lambda_{v0}$	[W/mK]	tepelná vodivost vody
$\eta_{H2}$	[Pa.s]	dynamická viskozita vodíku
$\rho_b$	[kg/l]	hustota benzínu
$\rho_{v0}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota vody
$\rho_{H2}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	střední hustota vodíku ve výměníku
$\rho_{LH2}$	[kg/l]	hustota kapalného vodíku
$\sigma_p$	[MPa]	napětí v ocelovém pásu
$\sigma_{\xi}$	[MPa]	napětí ve šroubech

## 1. Úvod

Vliv člověka na životní prostředí se začal negativně zvyrazňovat na konci 19. století, kdy došlo k velkému rozvoji průmyslových odvětví. To mělo za následek postupné poškozování přírody. Hlavním problémem v minulém století bylo a také nyní zůstává spalování fosilních paliv. Jedná se o vypalování deštných pralesů, spalování uhlí k výrobě elektrické energie, ale nejvýrazněji se zde projevuje spalování benzínu a nafty ve stále se rozrůstající automobilové dopravě. Tento trend vede k vysoké produkci oxidu uhličitého, který není sice pro lidský organismus škodlivý, ale celosvětově způsobuje skleníkový efekt se všemi negativními důsledky. Jeho zvýšená koncentrace v atmosféře destabilizuje vysoce komplexní klimatický systém. Lze pozorovat nárůst globální teploty ovzduší, což způsobuje tání ledovců, které má za následek stoupání hladiny moří i ohrožení stávající flóry a fauny. Dále ještě dochází k produkci oxidu uhelnatého a oxidů dusíku, které jsou zase velmi škodlivé pro lidský organismus. Protože zásoby fosilních paliv nejsou bezedné a podle odhadů vystačí pouze na několik dalších desetiletí, je třeba se poohlédnout po nějakém ekologickém a snadno dostupném palivu.

Tímto palivem by mohl být vodík, který ale nelze brát jako zdroj energie, je pouze jejím nosičem. Vodík se v současnosti vyrábí několika způsoby (např. parním reformováním zemního plynu, zplyňováním uhlí nebo parciální oxidací ropných frakcí). Tyto způsoby nejsou příliš vhodné z důvodu, že jde o fosilní paliva (neobnovitelné zdroje). Dále se vodík vyrábí z vody elektrolýzou. K tomu je třeba elektrická energie, ta se v současné době bohužel z největší části vyrábí právě spalováním fosilních paliv. Tento postup by v konečném účtování nebyl příliš ekologický. Jednou z možností je rozšíření ekologických zdrojů energie (jaderné, vodní, větrné, solární, ...elektrárny). Při tomto postupu je vodík současným nejčistším palivem, ale jeho výroba je poměrně drahá. Další variantou, do které vkládají vědci velké naděje je způsob, kdy se velké množství energie získává pomocí termonukleární reakce (jaderné fúze). Při této reakci se energie uvolňuje ve formě tepla, které se dá již běžně známými způsoby přeměnit na energii elektrickou. Z níž by se dalo vyrábět téměř neomezené množství vodíku.

Existují více méně dvě varianty pohonu automobilu vodíkem. První spočívá v tom, že se v palivových článcích vyrobí elektrická energie, která napájí elektromotor pohánějící vozidlo. Druhá je založena na spalování vodíku přímo v zážehovém motoru automobilu. V mé diplomové práci se zabývám touto variantou.

## 2. Vodíkový pohon

### 2.1 Fyzikální vlastnosti vodíku

Čistý vodík je bezbarvý, bez chuti a zápachu. Proud vodíku z netěsnosti je proto v denním světle neviditelný. Není toxický, ale může působit jako dusivý, neboť zaujme postavení ve vzduchu místo kyslíku. Vodík má nejnižší atomovou hmotnost ze všech prvků, a proto mají obě jeho využívaná skupenství (jak plyn, tak kapalina) velmi nízkou hustotu. Má druhou nejnižší teplotu varu, nižší má jen helium, a nejnižší bod tání ze všech prvků. Vodík se stává kapalinou pod teplotou varu  $-252,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $20,2\text{ K}$ ) a pevnou látkou pod bodem tání  $-259,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $14,0\text{ K}$ ) za normálního tlaku. Je zřejmé, že tyto teploty patří k extrémně nízkým. Teploty pod  $200\text{ K}$  ( $-73,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) jsou souhrnně nazývány kryogenními, kapaliny při těchto teplotách nízkoteplotními. [1]

### 2.2 Vodík jako palivo pro zážehový motor

Energie obsažená ve vodíku je uvolněna přímo ve spalovacím motoru. Tento způsob je založen na tom, že do válce se nejprve nasaje vzduch a při kompresi se vefukovacím ventilem vefoukne do válce plyný vodík. Spalování probíhá s vysokým přebytkem vzduchu.

### 2.3 Emise vznikající při spalování vodíku

Vodík je ekologickým palivem budoucnosti. Je-li vyráběn elektrolyticky pomocí solární, větrné nebo jinak ekologicky získávané energie, je vůbec nejčistším palivem. V uzavřeném cyklu je vodík získáván z vody a jeho spalováním opět voda vzniká. Při spalování vodíku navíc nevznikají škodliviny jako při spalování fosilních paliv. Minimální množství oxidů dusíku zapříčiňuje dusík obsažený ve vzduchu a jejich množství závisí na teplotě spalování. Stopová množství uhlovodíků, oxidu uhelnatého, pevných částic nebo oxidu siřičitého ve spalinách jsou zapříčiněna spálením zbytků motorových olejů. Bez dalších přídavných zařízení pracují vodíkové motory prakticky bez emisí, oproti benzínu jsou všechny emisní komponenty sníženy až o 99,9 %.

## 2.4 Budoucnost, výhody a nevýhody LH<sub>2</sub>

V současnosti zatím nemá vodíkem poháněné vozidlo vyšší efektivitu než klasická koncepce pohonu (je nutno započítat celý řetězec od výroby přes skladování a čerpání až po konečnou spotřebu). Pokud by byl vodík v současnosti vyráběn elektrolýzou vody s využitím elektřiny z tepelných elektráren, nebude jeho využívání přispívat ani k snížení emisí skleníkových plynů.

### Výhody:

- Ekologický provoz (pouze při výrobě vodíku z obnovitelných zdrojů)
- Nezávislost na palivech fosilního původu

### Nevýhody:

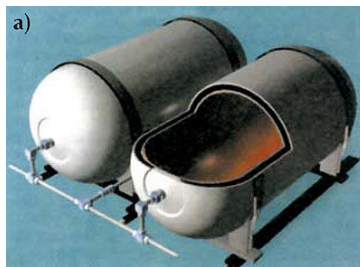
- V současné době nákladnější než pohon běžnými palivy
- Vysoká cena přestavby automobilu na vodík
- Chybějící síť čerpacích stanic na vodík

## 2.5 Způsoby uskladnění vodíku

Velmi důležitou věcí se stává otázka skladování vodíku. Vodík má nejnížší hustotu jakožto plyn a druhý nejnížší bod varu (nižší má jen helium) ze všech známých látek. Tyto vlastnosti podmiňují varianty řešení skladování jak ve formě plynné, tak i kapalné. Skladování ve formě plyné vyžaduje velký objem zásobníků a vysoké tlaky, ve formě kapalné pak kryogenní systém skladování. Prakticky vzato, vodík může být skladován jako plyn při vysokých tlacích, jako kapalina v kryogenních zásobnících, jako plyn chemicky vázaný (např. v hydridech kovů) [1]

### 2.5.1 Skladování vodíku v plynném skupenství

Vysokotlaké systémy skladování vodíku jsou nejvíce používaným způsobem. Většina existujících mobilních aplikací palivových článků užívá zmíněný systém skladování vodíku. Stlačený vodík se uskládá ve speciálních tlakových lahvích. Většina tlakových zásobníků je válcovitého tvaru. Vysokotlaké zásobníky plynu musí být konstruovány z tlustostěnných, vysokopevnostních materiálů dlouhodobé životnosti. Skladovací tlak se obvykle používá 25 MPa, i když se zkoušejí zásobníky na provozní tlak 70 MPa. Navzdory potenciálnímu nebezpečí, které představuje při poškození únik proudu plynu s explozivními účinky, jsou vysokotlaké zásobníky bezpečné. [1]



Obr. 1 Plynný vodík pod tlakem 30 MPa (250 l) [9]

#### Výhody:

- Malá energetická náročnost stlačení vodíku
- Jednoduchost (nižší cena)
- Dlouhodobá skladovatelnost vodíku v nádržích

#### Nevýhody:

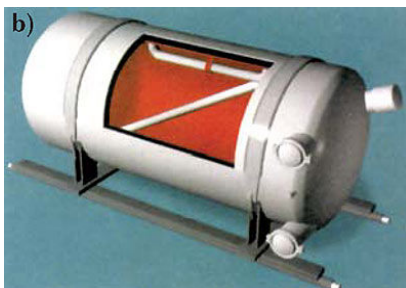
- Velké rozměry (malá energetická hustota vodíku v plynném stavu)
- Nebezpečí úniku při havárii

### 2.5.2 Skladování vodíku v kapalném skupenství

Systémy skladování vodíku v kapalně fázi překonávají mnoho problémů spojených s objemem a hmotností při vysokotlakém skladování vodíku, avšak za cenu potřeby zajištění kryogenních teplot. Kapalný vodík může být skladován pod svým bodem varu, kterého za normálního tlaku dosáhne při  $-252,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $20,2\text{ K}$ ). Kapalný vodík je obvykle skladován v nádržích vybavených tepelnou superizolací, nebo v Dewarových nádobách, které mají dvojitou stěnu s vysoce vakuovým meziprostorem. Zásobníky tekutého vodíku nepotřebují vysokotlaké nádoby, a proto nemusí být tak robustní. Vodík nemůže být skladován v zásobnících neomezeně dlouhou dobu. Všechny zásobníky, bez ohledu na kvalitu izolace, umožňují přenos tepla mezi okolím a zásobníkem. Velikost přívodu tepla závisí na konstrukci a objemu zásobníku. Tento přenos tepla vede k odpařování vodíku a zvyšování tlaku v nádrži. Ačkoli skladování kapalného vodíku eliminuje nebezpečí spojená s vysokotlakým skladováním plynů, přináší dále nově vlastní nebezpečí spojená s nízkými teplotami. Vážná nebezpečí omrzlin existují ve spojení s kapalným vodíkem, jeho párami a kontaktními plochami. Uhlíkatá ocel, vystavená teplotám nižším  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se stává křehkou a je náchylná k lomu. Kapalný vodík má značnou hustotu oproti plynné fázi, oproti benzínu je velice objemný, vztaženo na rovnocenný energetický ekvivalent. Systémy skladování kapalného vodíku mohou mít až desetinásobnou hmotnost a objem než rovnocenná



benzínová nádrž. Proces zkapalnění je však energeticky tak náročný, že si vlastně vyžádá 30 – 40 % energie obsažené ve vodíku. Kapalnou formu vodíku lze relativně účinně transportovat a lehce používat. [1]



Obr. 2 Kapalný vodík  $LH_2$  při tlaku 0,4 MPa,  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  (140 l) [9]

#### Výhody:

- Velká energetická hustota  $\Rightarrow$  malé rozměry zásobníků

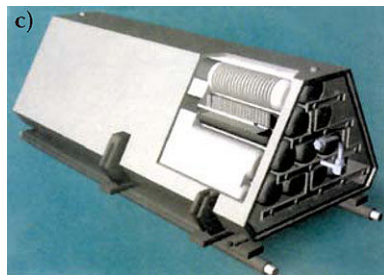
#### Nevýhody:

- Velká energetická náročnost na zkapalnění
- Nebezpečí úniku při havárii
- Únik vodíku pojistnými ventily v případě zvýšení tlaku v nádrži vlivem ohřátí vodíku nad bod varu

### 2.5.3 Skladování vodíku v hydridech kovů

Systémy skladování v hydridech jsou založeny na principu snadné absorpce plynu určitými materiály, za podmínek vysokého tlaku a teploty pohybujícími se kolem  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tyto látky pak uvolňují vodík jako plyn v případě, kdy jsou zahřívány při nízkých tlacích a relativně vysokých teplotách. V podstatě tyto materiály, kovy, nasávají a uvolňují vodík jako „houba“. Výhoda hydridových skladovacích systémů se soustřeďuje na fakt, že vodík se stává součástí chemické struktury těchto kovů, a proto dále není požadován vysoký tlak nebo kryogenní teplota pro vlastní provoz. Jelikož vodík je uvolňován z hydridů pro použití při nízkém tlaku, jsou hydridy ze své podstaty nejbezpečnější ze všech systémů skladování.

Existuje mnoho typů specifických hydridů kovů, primárně se však používají kovové slitiny hořčíku, niklu, železa a titanu. Hlavní nevýhodou skladovacích systémů na této bázi není jen teplota a tlak nutný pro extrakci vodíku, ale i velká hmotnost a cena, která vyplývá ze skutečnosti, že nejlepší hydridy obsahují jen 8 hmotnostních procent vodíku. Systém s hydridem kovu může mít až třicetinásobnou hmotnost a desetinásobný objem než nádrž s benzinem stejného energetického obsahu. [1]



Obr. 3 Hydridový zásobník 0,5 MPa (170 l) [9]

**Výhody:**

- Nejvyšší bezpečnost uložení vodíku

**Nevýhody:**

- Vysoká hmotnost a pořizovací cena zásobníků
- Energetická náročnost absorpce a extrakce vodíku

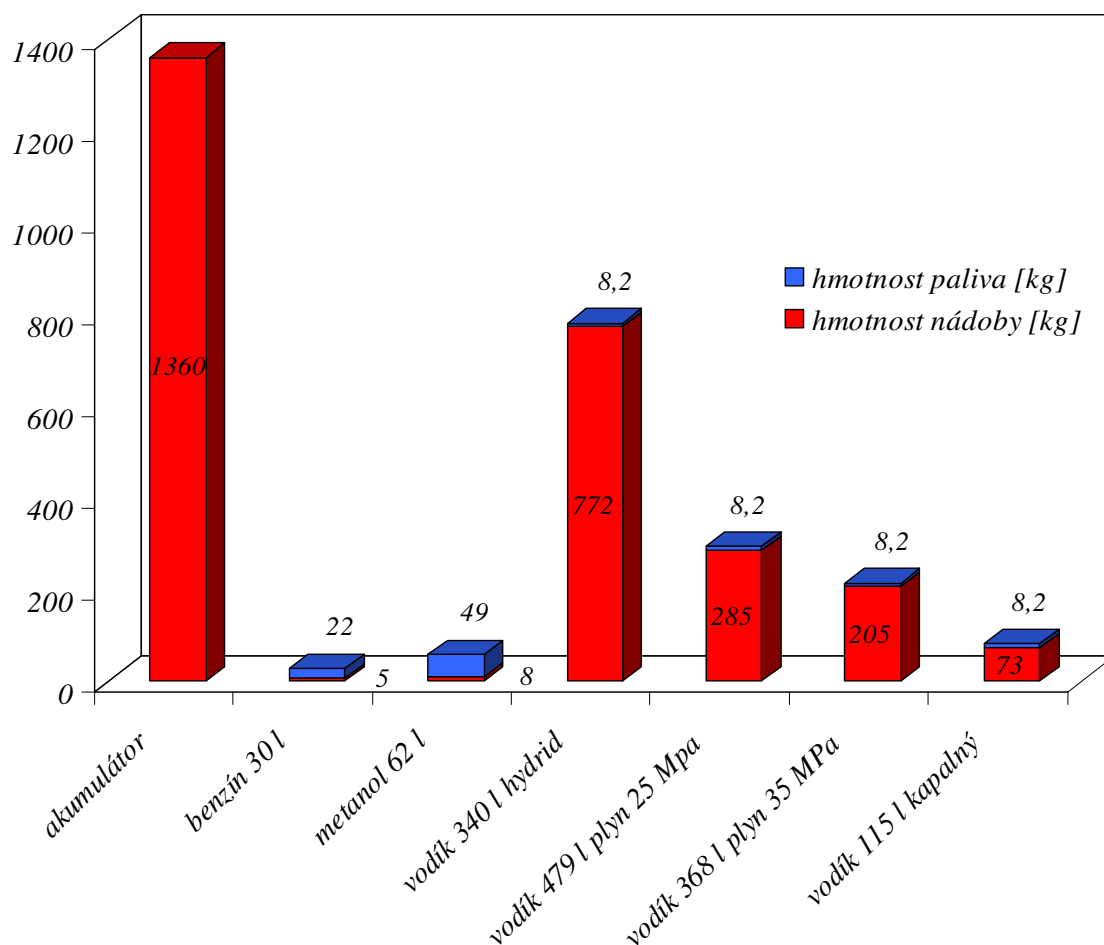
## 2.5.4 Další metody skladování vodíku

Mezi další alternativní metody skladování patří např. skladování ve formě amoniaku ( $\text{NH}_3$ ), skleněných mikrokapslí, nebo způsoby oxidační technologie železa. Jinou možností, stále ve fázi vývoje, je zachytit vodík na alkalicky obohacených uhlíkových nanotrubičkách. Dosud se tyto metody prakticky nevyužívají.

## 2.6 Porovnání hmotností paliv a jejich zásobníků

Na obr. 4 je uveden objem vodíku a hmotnost celého zařízení vztahující se k zmíněným způsobům skladování a dále v porovnání s benzínem, metanolem a uchováváním energie v akumulátorech (vztažené na energetický ekvivalent 1 044 500 kJ). Nízká hustota vodíku ve formě plynné i kapalně má za následek také nízkou hodnotu „hustoty energie“. Daný objem vodíku tedy obsahuje méně energie než stejný objem jiných paliv. Proto se například zvyšuje relativní skladovací objem nádrže pro dosažení dané dopravní vzdálenosti.

Přes nízkou objemovou energetickou hustotu disponuje vodík nejvyšším poměrem energie k hmotnosti ze všech paliv. Avšak tuto výhodu obvykle zastiňuje velká hmotnost zásobníku a návazných zařízení. Většina zásobníků vodíku je značně rozměrných a hmotných, a to víc než používané nádrže pro benzín či naftu.



Obr. 4 Znázornění objemového a hmotnostního množství jednotlivých paliv odpovídající energetickému ekvivalentu 1 044 500 kJ.

## 2.7 V současnosti jezdící automobily na LH<sub>2</sub>

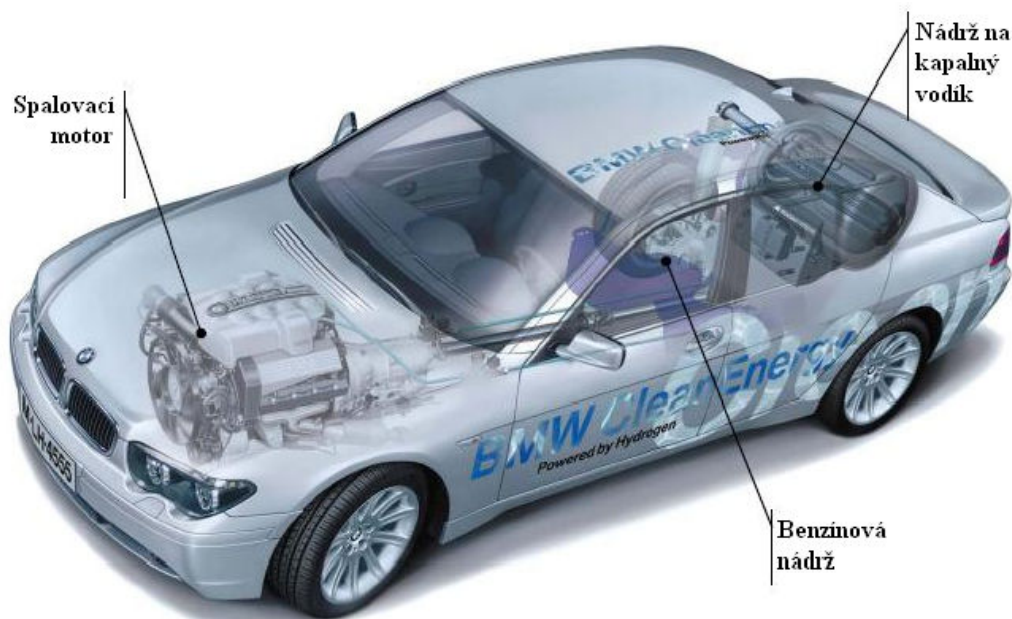
### 2.7.1 BMW Hydrogen 7

Automobilka BMW ve svém modelu na alternativní paliva použila osvědčený motor z vozu 760i a upravila ho pro specifické podmínky vodíku. Jde tedy o spalovací šestilitrový dvanáctiválcový agregát s výkonem 191 kW a maximálním točivým momentem 390 Nm. Zrychlení z 0 na 100 km/h činí u tohoto dvoupalivového typu 9,5 s, elektronický omezovač je přitom nastaven na hodnotu 230 km/h. Spalování vodíku probíhá až desetinásobně rychleji než spalování tradičního paliva. Tím je na jednu stranu dosaženo vyšší efektivity, na druhou stranu je motor velmi náročný na přesnou činnost ventilů. Cena tohoto automobilu je však zhruba milion eur.

Přepínání mezi vodíkovým a benzínovým palivem je vyřešeno tlačítkem na multifunkčním volantu. Typ paliva je pak identifikován kontrolkou na přístrojové desce.

Automaticky bude přepnuto na jiný druh paliva při vyčerpání jedné z nádrží tak, aby byla zaručena neustálá plynulá dodávka paliva do motoru. S ohledem na šetrnost k životnímu prostředí je při startování nastaveno vodíkové palivo. Typ paliva nemá žádný vliv na výkon či točivý moment motoru, takže jízdní vlastnosti jsou stejné při obou druzích paliva. Celkový dojezd BMW Hydrogen 7 je až 700 km. Benzinová nádrž o objemu 74 l vystačí na vzdálenost 500 km, kryogenní nádrž s kapacitou 8 kg tekutého vodíku zásobí motor na 200 km dojezdu. BMW zvolila tekutý vodík právě z důvodů vyšší hustoty energie.

Oproti plynnému vysoce stlačenému vodíku nabízí tekutý vodík až o 75 % více energie. Tím je také umožněn delší dojezd při stejné kapacitě nádrže. Vodíková nádrž je vytvořena ze dvou dvoumilimetrových stěn z nerezové oceli, které jsou odděleny 30 mm vrstvou vakua. Tankování tekutého vodíku není nijak náročné. BMW vytvořila standard pro čerpací hlavice. Řidič ovladačem v kabině otevře vodíkovou nádrž, do té zastrčí pistoli vodíkové trysky a všechno ostatní již probíhá automaticky. Nádrž je naplněna asi za osm minut. [12]



Obr. 5 BMW Hydrogen 7 [13]



Obr. 6 BMW Hydrogen 7 [13]

Obr. 7 Čerpací stanice LH<sub>2</sub> [13]

Obr. 8 Motor o výkonu 191 kW [13]

Obr. 9 Přepínání mezi LH<sub>2</sub> a benzínem [13]

### 3. Podmínky přestavby osobního automobilu na LH<sub>2</sub>

Dle mého zadání se budu zabývat uskladněním vodíku v kapalné formě (při tlaku  $p = 0,4 \text{ MPa}$  a teplotě  $T = 20 \text{ K}$ ), který uskladním v kryogenní nádrži umístěné v zavazadlovém prostoru automobilu Škoda Octavia 1,4 MPI,  $P = 59 \text{ kW}$ . Hlavním důvodem výběru tohoto nejslabšího motoru byl fakt, že nabídne co možná nejdelší dojezd na vodík. Sériově dodávaná benzínová nádrž je ve vozidle zachována v původní velikosti, provoz bude možný na vodík i na benzín.

#### 3.1 Příslušné normy

Dle bezpečnostního předpisu EHK 110:

- Nádrž musí být pevně namontována ve vozidle a nesmí být umístěna v motorovém prostoru.
- Nádrž musí být montována s vyloučením dotyku kov na kov, s výjimkou připevňovacích bodů nádrže.

- Palivová nádrž nesmí být montována níže než 200 mm nad povrchem vozovky při pohotovostním zatížení vozidla.
- Především ustanovení neplatí v případě, že nádrž je dostatečně chráněná zepředu a po stranách a žádná část nádrže není umístěna níže než její ochranný systém.
- Palivová nádrž nebo tlaková láhev musí být tak namontovány, aby mohly absorbovat (bez poškození) následující zrychlení při jejich plném naplnění.
- Vozidla kategorie M1 a N1:
  - a) 20g ve směru jízdy (podélný směr)
  - b) 8g ve směru vodorovně - kolmém na směr jízdy (příčný směr)

[7]

## 3.2 Způsoby regulace a odpařování vodíku

Odpařováním vodíku se z kapalného stává plynný vodík. Dle mého zadání je nutno plynný vodík před vstupem do motoru stlačit na hodnotu 10 MPa. V nádrži je vodík v kapalném stavu uskladněn o teplotě  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ , což vede k dosti velké energetické náročnosti při ohřátí na teplotu  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , při které je možno vodík vefukovat do válců.

### 3.2.1 Nízkotlaká nádoba s dvojčinnou tlakovou cestou

Tento systém je založen na principu uskladnění vodíku v nádrži o tlaku 0,4 MPa, při teplotě  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kdy vodík je v kapalném stavu střídavě přepouštěn do malých vysokotlakých zásobníků (trifekta), ve kterých se přívodem tepla vypařuje a současně zde roste tlak nad požadovaných 10 MPa. Jeden zásobník vodík dodává a ve druhém se současně připravuje. Po částečném vypuštění vodíku, kdy tlak klesne na hodnotu 10 MPa, se musí vždy zbylý vodík vypustit do atmosféry, aby se mohl opět dodat kapalný. Na společném výstupu je ještě třeba vodík ohřát na požadovaných  $-100^{\circ}\text{C}$ , protože při odpařování se teplo spotřebuje na odpar a zvýšení tlaku, teplota stoupne jen minimálně.

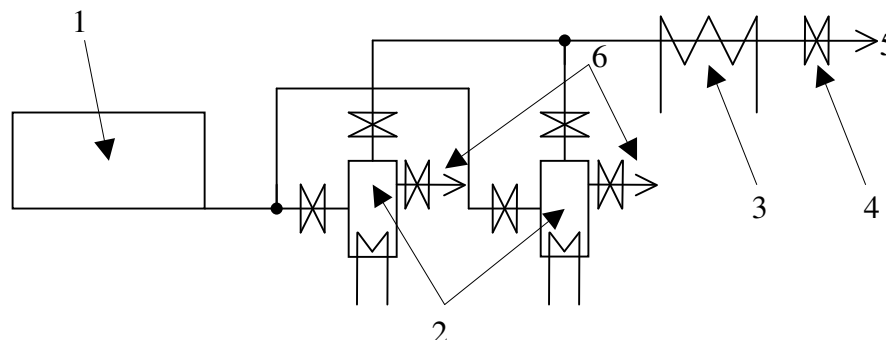
#### Výhody:

- Funkčnost a spolehlivost tohoto způsobu
- Uskladnění vodíku pod nízkým tlakem

#### Nevýhody:

- Složitost, rozměrnost a finanční náročnost
- Dodávání tepla se děje při vysokém tlaku  $\Rightarrow$  složitá konstrukce výměníku

- Vypouštěný vodík ze zásobníku o tlaku 10 MPa



Obr. 10 Nízkotlaká nádoba s dvojčinnou tlakovou cestou

#### Legenda:

- 1 Kryogenní nádrž (tlak 0,4 MPa, teplota -253 °C)
- 2 Systém trifekta (zásobníky s elektrickým topením)
- 3 Vodní výměník
- 4 Redukční tlakový ventil
- 5 Vstup do motoru (tlak 10 MPa, teplota -100 °C)
- 6 Vypouštěcí vedení do atmosféry

### 3.2.2 Nízkotlaká nádoba s kompresorem

V tomto způsobu je vodík opět uložen v kryogenní nádrži o nízkém tlaku 0,4 MPa a teplotě -253 °C. Odpařování probíhá přímo v hlavní nádrži a je zajištěno trubkovým výměníkem umístěným na dně nádrže. Z nádrže je odebírán plynný vodík, který se hromadí v horní části. Ten se ve vodním výměníku ohřívá na požadovanou teplotu -100 °C. Stlačování vodíku provádí kompresor, regulaci na požadovaný tlak 10 MPa zajišťuje redukční tlakový ventil před vstupem do motoru.

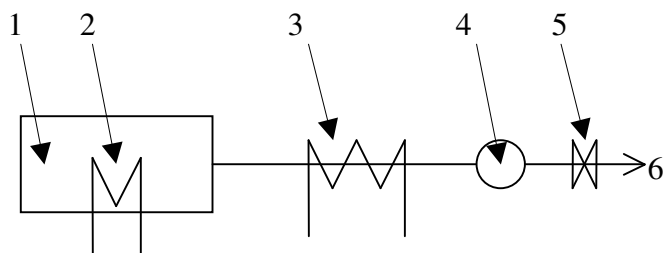
#### Výhody:

- Jednoduchost
- Přívod tepla se děje při nízkém tlaku  $\Rightarrow$  jednodušší konstrukce výměníku

#### Nevýhody:

- Složitá konstrukce vysokotlakého vodíkového kompresoru





*Obr. 11 Nízkotlaká nádoba s kompresorem*

**Legenda:**

- 1 Kryogenní nádrž (tlak 0,4 MPa, teplota -253 °C)
- 2 Výměník uvnitř nádrže
- 3 Vodní výměník
- 4 Vodíkový kompresor
- 5 Redukční tlakový ventil
- 6 Vstup do motoru (tlak 10 MPa, teplota -100 °C)

### 3.2.3 Vysokotlaká nádoba

Princip tohoto zařízení je založen na uskladnění zkapalněného vodíku pod tlakem převyšujícím 10 MPa a teplotě -253 °C v tlakovém zásobníku. Odpařování probíhá přímo v tlakové nádobě přivedením tepla. Plynný vodík se hromadí v horní části nádrže a na výstupu z ní je umístěn vodní výměník, ve kterém je dodáno potřebné teplo pro jeho ohřev na teplotu -100 °C. Regulaci na tlak 10 MPa zajišťuje redukční tlakový ventil umístěný před vstupem do motoru.

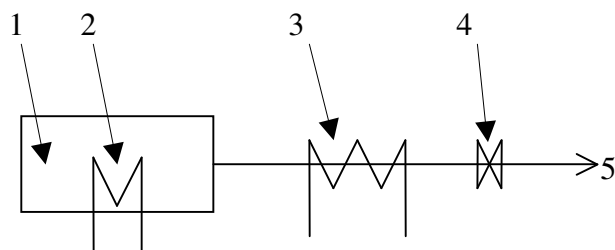
**Výhody:**

- Není potřeba další přídatné zařízení

**Nevýhody:**

- Vysoký tlak v nádrži  $\Rightarrow$  mohutnější a těžší nádrž
- Dodávání tepla se děje při vysokém tlaku  $\Rightarrow$  složitá konstrukce výměníku





Obr. 12 Vysokotlaká nádoba

### Legenda:

- 1 Kryogenní nádrž (tlak nad 10 MPa, teplota -253 °C)
- 2 Výměník uvnitř nádrže
- 3 Vodní výměník
- 4 Redukční tlakový ventil
- 5 Vstup do motoru (tlak 10 MPa, teplota -100 °C)

## 4. Automobil Škoda Octavia 1,4 MPI

### 4.1 Technická data

Hmotnosti	Jednotka	Hodnota
Celková hmotnost	kg	1890
Provozní hmotnost	kg	1230 - 1420
Užitečné zatížení	kg	660 - 470
Karoserie	Jednotka	Hodnota
pětimístná dvouprostorová, pětidveřová	-	-
Součinitel odporu vzduchu	Cw	0,30
Objem palivové nádrže	l	55
Provozní vlastnosti	Jednotka	Hodnota
Emise CO <sub>2</sub> (kombinované)	g/km	168 - 170
Nejvyšší rychlost	km/h	173
Zrychlení z 0 na 100 km/h	s	14,2
Spotřeba - městský cyklus	l/100km	9,6 - 9,7
Spotřeba - mimo město	l/100km	5,6 - 5,7
Spotřeba - kombinovaná	l/100km	7,0 - 7,1

Motor	Jednotka	Hodnota
1,4 MPI 59 kW 5 - stup. mech. zážehový motor, 2xOHC, uložený vpředu napříč	-	-
Počet válců	-	4
Objem	cm <sup>3</sup>	1390
Největší výkon při otáčkách/min	kW/min	59/5000
Největší točivý moment při ot./min	Nm	132/3800
Palivo	-	Natural 95(91)
Zdvih	mm	75,6
Exhalační norma	-	EU 4
Vrtání	mm	76,5

tab. 1 [10]

## Podvozek

**Přední náprava:** zavěšení McPherson se spodními trojúhelníkovými rameny a příčným zkrutným stabilizátorem.

**Zadní náprava:** víceprvkové zavěšení s podélným a příčnými rameny a příčným zkrutným stabilizátorem.

**Brzdy:** kapalinové dvouokruhové, diagonálně propojené s podtlakovým posilovačem Dual - Rate.

**Brzdy vpředu:** kotoučové, s kotouči s vnitřním chlazením a jednopístovými plovoucími třmeny.

**Brzdy vzadu:** kotoučové.

**Parkovací brzda:** ruční mechanická na zadní kola.

**Řízení:** hřebenové přímočinné s elektromechanickým posilovačem.

## Pohon

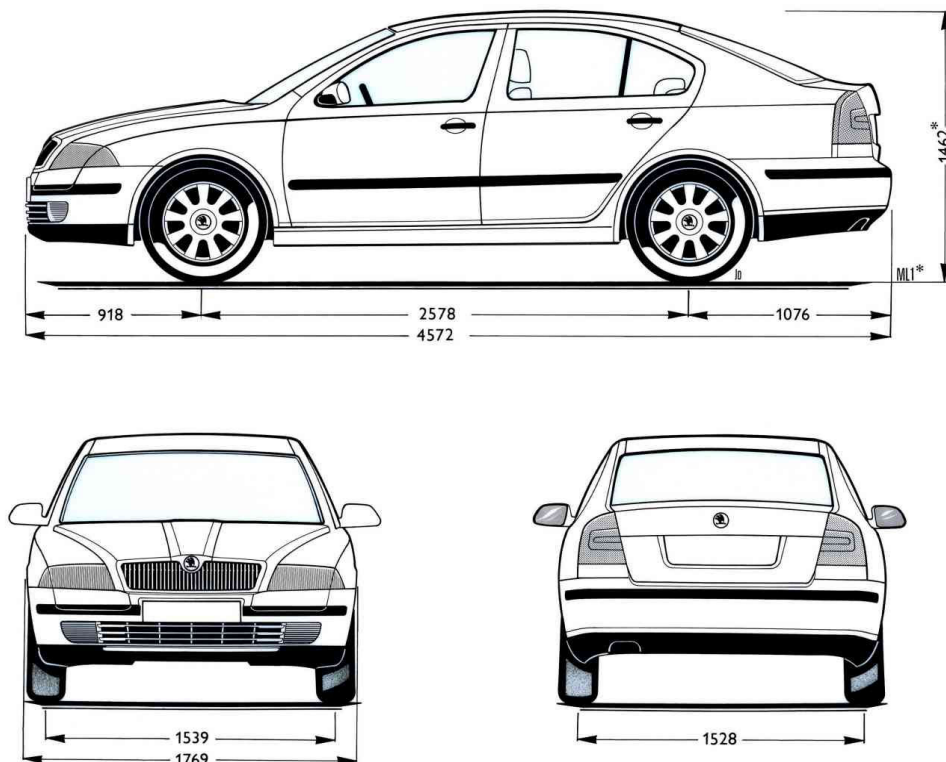
**Pohon:** Pohon předních kol.

**Spojka:** hydraulicky ovládaná, jednokotoučová.

**Převodovka:** mechanická pětistupňová, plně synchronizovaná.

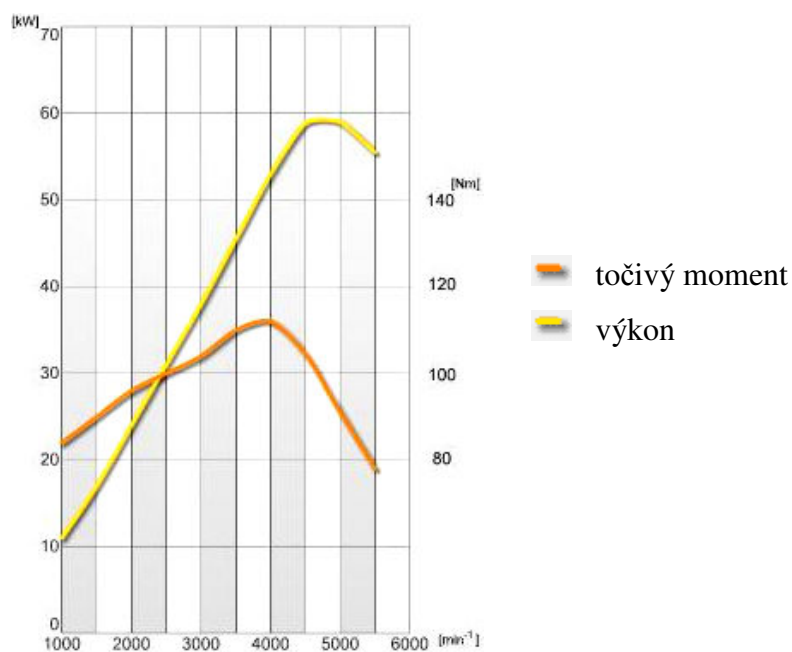
[10]

## 4.2 Základní rozměry



Obr. 13 Základní rozměry vozu Škoda Octavia [11]

## 4.3 Otáčková charakteristika motoru



Obr. 14 Otáčková charakteristika motoru 1,4 MPI [10]

## 4.4 Dojezd vozidla

Objem nádrže  $V = 55 \text{ l}$ , ale naplnění kapalným vodíkem uvažuji  $V' = 50 \text{ l}$ .

Hustota kapalného vodíku:

$$\rho_{LH_2} = 0,07 \text{ kg / l}$$

Hmotnost kapalného vodíku v nádrži:

$$m_{LH_2} = V' \cdot \rho_{LH_2} = 3,5 \text{ kg} \quad (1)$$

Při výpočtu použiji přepočtení přes výhřevnost na benzín.

Výhřevnost vodíku:  $Q_{LH_2} = 120 \text{ MJ / kg}$

Výhřevnost benzínu:  $Q_b = 45 \text{ MJ / kg}$

Hustota benzínu:  $\rho_b = 0,7 \text{ kg / l}$

Srovnatelný odpovídající objem benzínu:

$$V_b = \frac{Q_{LH_2}}{Q_b} \cdot \frac{m_{LH_2}}{\rho_b} = 13,3 \text{ l} \quad (2)$$

Spotřeba benzínu pro daný motor udávaná výrobcem:  $V_{100} = 7,1 \text{ l / 100 km}$

Dojezd na vodík:

$$s_{LH_2} = \frac{V_b}{V_{100}} \cdot 100 = 187 \text{ km} \quad (3)$$

Dojezd na benzín:

$$s_{ben} = \frac{V_{ben}}{V_{100}} \cdot 100 = 775 \text{ km} \quad (4)$$

$V_{ben} = 55 \text{ l}$  ... objem benzínové nádrže

## 5. Zástavba kryogenní nádrže do automobilu

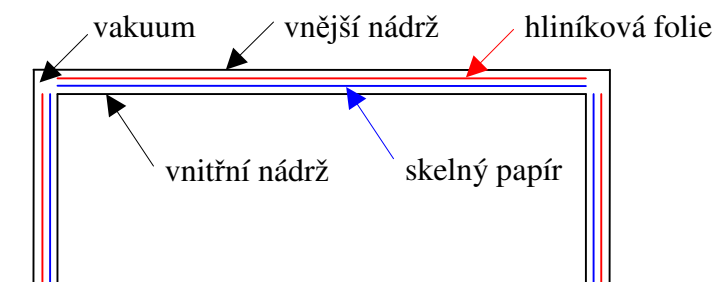
### 5.1 Parametry kryogenní nádrže

Nádrže na zkapalněný vodík se sériově nevyrábějí, proto jsem při návrhu použil nádrž na zkapalněný zemní plyn, na které jsem navrhl úpravy. Jako nejvhodnější připadla v úvahu nádrž od firmy MVE (Inc., 3505 County Road 42 West, Burnsville, USA). Jelikož zkapalněný zemní plyn se skladuje při teplotě  $-163 \text{ °C}$  a zkapalněný vodík až při teplotě  $-253 \text{ °C}$ , musel jsem zesílit superizolaci z 30 na 50 vrstev hliníkové folie + skelného papíru. Účinek tohoto odizolování (superizolace spojená s vysoce

vakuovým prostorem) je rovnocenný 17 m polystyrénové pěny. Z katalogového listu firmy MVE jsem vybral nádrž s označením HLNG 17, u které jsem zvětšil vnější průměr o 60 mm. Tento postup jsem zvolil po dohodě s mým konzultantem.

**Parametry upravené nádrže jsou následující:**

- objem:  $V = 55 \text{ l}$
- průměr:  $D = 465 \text{ mm}$
- délka:  $l_n = 870 \text{ mm}$
- hmotnost prázdná:  $m = 45 \text{ kg}$
- hmotnost plná:  $m' = 70 \text{ kg}$
- maximální přípustný tlak:  $1,6 \text{ MPa}$
- rozmezí pracovního tlaku:  $0,17 - 1,38 \text{ MPa}$
- materiál vnitřní a vnější nádoby: 304 nerez ocel



Obr. 15 Schéma nádrže

### 5.1.1 Síly působící na nádrž

Síla ve směru jízdy:

$$F_p = 20 \cdot m' \cdot g = 13734 \text{ N} \quad (5)$$

Síla v bočním směru:

$$F_b = 8 \cdot m' \cdot g = 5494 \text{ N} \quad (6)$$

$g = 9,81 \text{ m/s}^2 \dots$  gravitační zrychlení

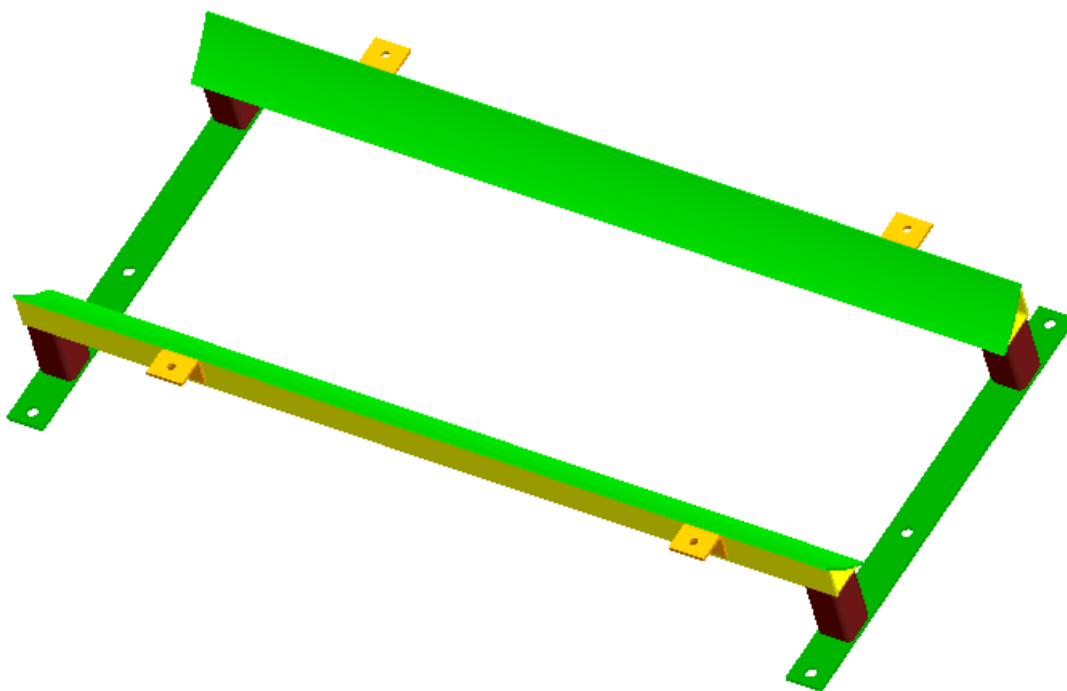
## 5.2 Konstrukce rámu k upevnění nádrže

Rám (viz obr. 16) k uchycení nádrže jsem navrhl svařit z normalizovaných polotovarů materiálu 11 523.1 hlavním důvodem byla velmi dobrá svařitelnost této ocele.

Při mém zkoumání podobných upevnění nádrží jsem zjistil, že mnohdy jsou různě připevněny jak k podlaze zavazadlového prostoru, tak také k jeho svislým bokům. Toto řešení se mi ale nezdálo příliš vhodné, protože při bočním nárazu dojde k zdeformování těchto rámců a mohlo by dojít k poškození samotné nádrže. Proto jsem dal přednost možnosti upevnit nádrž pouze k podlaze. Mezi zadními podběhy kol a rámem nechat vždy alespoň malou mezeru, která by plnila funkci deformační zóny při eventuální nehodě.

Svařovaný rám jsem uložil napříč, těsně za zadní sedadla. Uchycení jsem provedl pomocí šesti šroubů M12 k podlaze zavazadlového prostoru. Počítám s tím, aby veškeré zatížení mezi rámem a podlahou automobilu bylo přeneseno třecí silou (17), nikoliv namáháním šroubů na stříh. Tato třecí síla bude vytvořena dostatečně velkým předpětím šroubů.

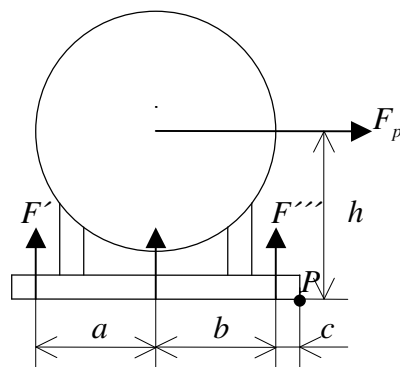
Důsledkem toho, že uskladňuji vodík v kapalném stavu, při kterém se vnitřní přetlak pohybuje maximálně kolem 0,4 MPa, není nádrž příliš robustní. Z toho důvodu jsem navrhl kontaktní plochy mezi nádrží a rámem dostatečně velké, aby při případné nehodě automobilu nedošlo k poškození nádrže.



*Obr. 16 Svařovaný rám*

### 5.2.1 Výpočty ohledně připevnění rámu k podlaze

Rám je v příčném směru souměrný, proto zde uvádím na schématu pouze polovinu.



Rozměry:

$$a = 185\text{mm}$$

$$b = 275\text{mm}$$

$$c = 15\text{mm}$$

$$h = 250\text{mm}$$

Obr. 17 Schéma rámu

Momentová rovnice k hraně P:

$$F_p \cdot h = 2[F'(a+b+c) + F''(b+c) + F''' \cdot c] \quad (7)$$

Z poměru síly/vzdálenosti:

$$\frac{F'}{a+b+c} = \frac{F''}{b+c} = \frac{F'''}{c} \quad (8)$$

Dosazení do základní momentové rovnice a vyjádření sil:

$$F' = \frac{F_p \cdot h}{2 \left[ (a+b+c) + \frac{(b+c)^2}{a+b+c} + \frac{c^2}{a+b+c} \right]} = 2631\text{N} \quad (9)$$

$$F'' = \frac{F_p \cdot h}{2 \left[ \frac{(a+b+c)^2}{b+c} + (b+c) + \frac{c^2}{b+c} \right]} = 1606\text{N} \quad (10)$$

$$F''' = \frac{F_p \cdot h}{2 \left[ \frac{(a+b+c)^2}{c} + \frac{(b+c)^2}{c} + c \right]} = 83\text{N} \quad (11)$$

Volím šrouby M12 jakostní třídy 8.8  $\rightarrow$  mez kluzu  $Re_s = 640\text{MPa}$

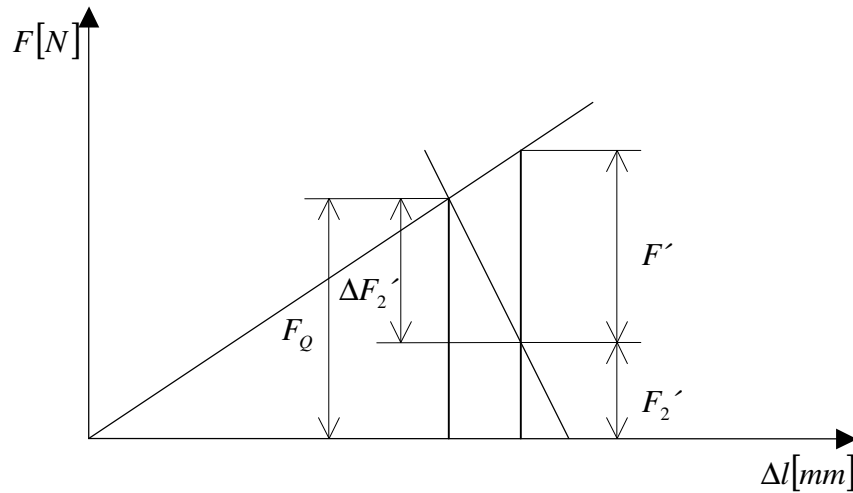
M12  $\rightarrow d_2 = 10,863\text{mm}$

$$d_3 = 9,853\text{mm}$$

$$s_s = 1,75\text{mm}$$

Výpočtový průřez:

$$S_j = \frac{\pi}{4} \left( \frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 = 84,3 \text{ mm}^2 \quad (12)$$



Obr. 18 Diagram předpjatého šroubu

Nejvíce namáhaná bude dvojice šroubů zatížená silami  $F'$ , proto budu kontrolovat pouze tento jeden šroub.

Předpětí šroubů volím:  $F_Q = 30 \text{ kN}$

Poměr tuhosti příruby a šroubu uvažuji:  $\frac{c_p}{c_s} = 3$

$$\Delta F_2 = F' \frac{c_p}{c_s + c_p} = \frac{3}{4} F' \quad (13)$$

Snížení jednotlivých sil v sevřených částech:

$$\Delta F_2' = \frac{3}{4} F' = 1973 \text{ N} \quad (14)$$

$$\Delta F_2'' = \frac{3}{4} F'' = 1205 \text{ N} \quad (15)$$

$$\Delta F_2''' = \frac{3}{4} F''' = 62 \text{ N} \quad (16)$$

Třecí síla mezi podlahou a rámem:

$$F_t = 2(3 \cdot F_Q - \Delta F_2' - \Delta F_2'' - \Delta F_2''') f_o = 17352 \text{ N} \geq F_p \dots \text{vyhovuje} \quad (17)$$

$$f_o = 0,1$$



Síla působící na šroub od sevřené části:

$$F_2' = F_Q - \Delta F_2' = 28027 N \quad (18)$$

Napětí ve šroubech:

$$\sigma_s = \frac{F' + F_2'}{S_j} = 363,6 MPa \quad (19)$$

Bezpečnost:

$$k_s = \frac{Re_s}{\sigma_s} = 1,76 \quad (20)$$

Úhel stoupání závitu:

$$\gamma = \arctg\left(\frac{s_s}{\pi \cdot d_2}\right) = 2,935^\circ \quad (21)$$

Třecí úhel:

$$\varphi' = \arctg\left(\frac{f}{\cos \alpha_1}\right) = 6,587^\circ \quad (22)$$

$f = 0,1 \dots$  součinitel tření v závitu

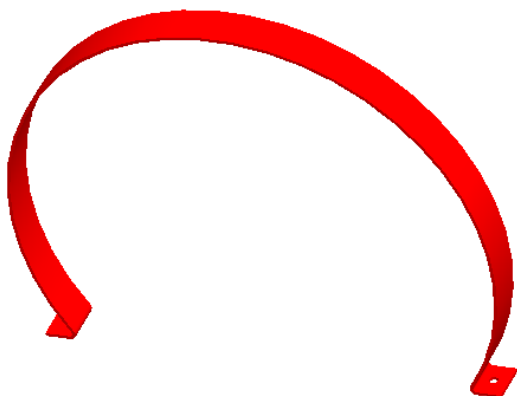
$\alpha_1 = 30^\circ \dots$  polovina úhlu závitu šroubu

Utahovací moment:

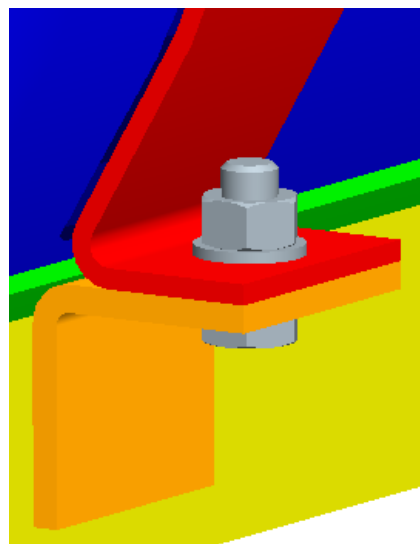
$$M_U = \frac{3}{4} \cdot d_2 \cdot F_Q \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi') = 40998 Nmm \quad (23)$$

### 5.3 Způsob připevnění nádrže k rámu

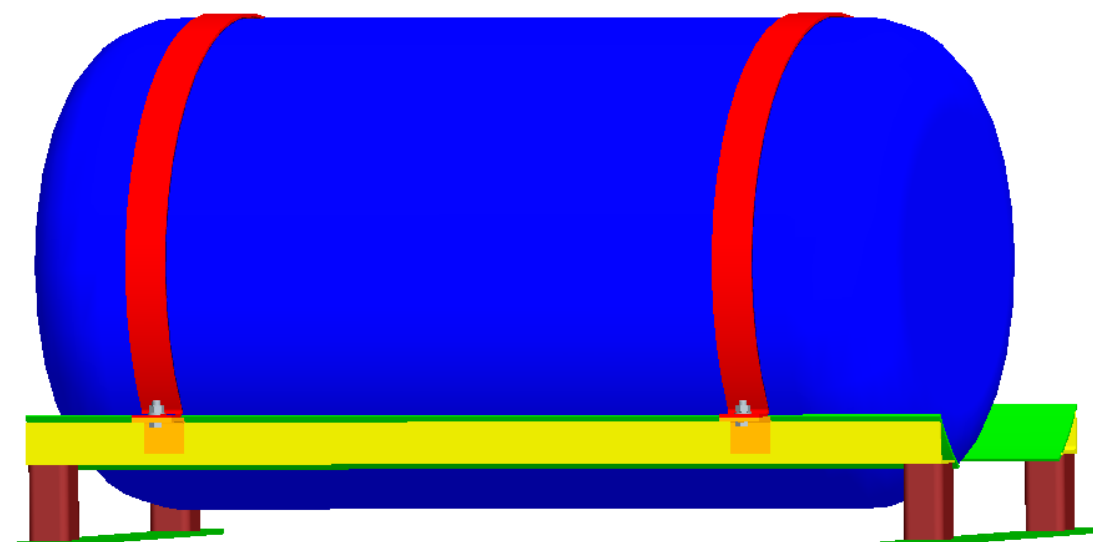
Nádrž jsem k rámu připevnil pomocí ocelových pásů (viz obr. 19), pod které pro zvýšení součinitele smykového tření jsem umístil pryžové pásy tloušťky 1 mm. Ocelové pásy musí být přitaženy s dostatečně velkým předpětím, které udrží nádrž na místě jak v podélném, tak i příčném směru. Toto předpětí vyvodí z každé strany ocelového pásu šrouby M8, které tyto pásy rovněž připevňují k rámu pomocí příložek (viz obr. 20). Tyto příložky jsou k rámu přivařeny. Ocelové pásy jsou velikosti průměru nádrže zvětšené o tloušťku pryžového pásu, vůli pro předpětí zajistí mezera 2 mm mezi ocelovým pásem a příložkou.



Obr. 19 Ocelový pás



Obr. 20 Příložka s pásem a šroubem

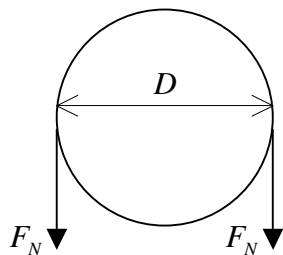


Obr. 21 Rám s nádrží

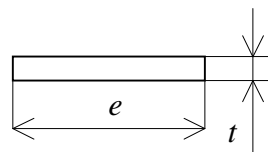
Při zatížení podélnou silou nedojde prakticky k žádnému posuvu nádrže, která se opře o podélné podložky. Tudíž nenastane téměř žádné prodloužení ocelových pásů (mikrodeformace), kterou lze zanedbat. Z toho vyplývá, že pokud nedojde k žádné deformaci pásů, nezvýší se v nich napětí. Budu proto uvažovat, že napětí v pásu (35) bude způsobené pouze předpětím. Tuto hypotézu jsem konzultoval s prof. Ing. J. Honcům, CSc. z katedry Částí a mechanismů strojů.

Zatížení v příčném směru přeneseme nádrž na rám pomocí třecích sil mezi nádrží a ocelovými pásy s pryžovými pásky. Z odborné literatury jsem součinitel tření navrhl  $f_p = 0,5$ .

### 5.3.1 Výpočty související s připevněním nádrže k rámu



Obr. 22 Průřez nádrže



Obr. 23 Průřez pásu

Rozměry:

$$t = 3mm$$

$$e = 40mm$$

$$D = 465mm$$

Pásek jsem navrhl předeprnout na sílu:  $F_N = 5000N$

$$F_N = D \cdot e \cdot p \quad (24)$$

Volím šrouby M8 jakostní třídy 8.8  $\rightarrow$  mez kluzu  $Re_s = 640MPa$

$$M8 \rightarrow d_2 = 7,188mm$$

$$d_3 = 6,466mm$$

$$s_s = 1,25mm$$

Výpočtový průřez:

$$S_j = \frac{\pi}{4} \left( \frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 = 36,6mm^2 \quad (25)$$

Napětí ve šroubech:

$$\sigma_s = \frac{F_N}{S_j} = 136,6MPa \quad (26)$$

Bezpečnost:

$$k_s = \frac{Re_s}{\sigma_s} = 4,7 \quad (27)$$

Úhel stoupání závitu:

$$\gamma = \arctg \left( \frac{s_s}{\pi \cdot d_2} \right) = 3,168^\circ \quad (28)$$

Třecí úhel:

$$\varphi' = \arctg \left( \frac{f}{\cos \alpha_1} \right) = 6,587^\circ \quad (29)$$

$f = 0,1 \dots$  součinitel tření v závitu

$\alpha_1 = 30^\circ \dots$  polovina úhlu závitu šroubu

Utahovací moment:

$$M_U = \frac{3}{4} \cdot d_2 \cdot F_N \cdot \tan(\gamma + \varphi') = 4634 \text{ Nmm} \quad (30)$$

Tlak působící na nádrž od ocelových pásů:

$$p_{p1} = \frac{2 \cdot F_N}{D \cdot e} = 0,54 \text{ MPa} \quad (31)$$

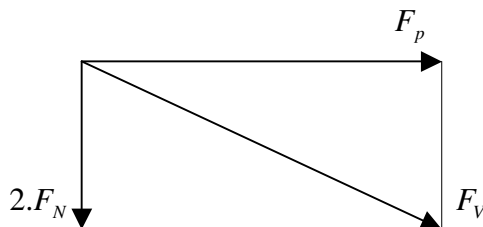
Boční třecí síla:

$$F_{tb} = 4 \cdot F_N \cdot f_p = 10000 \text{ N} \geq F_b \dots \text{vyhovuje} \quad (32)$$

$$f_p = 0,5$$

**Tlak působící na nádrž od podélných podložek:**

Uvažuji případ, kdy bude nádrž stažena pásy a ještě dojde k podélnému zatížení silou  $F_p$ . Z těchto sil určím výslednici  $F_v$ , kterou bude zatížena pouze jedna podélná podložka. Na každou podélnou podložku počítám dvě síly od příslušných pásů.



Obr. 24 Schéma sil

Výsledná síla  $F_v$ :

$$F_v = \sqrt{F_p^2 + (2 \cdot F_N)^2} = 16989 \text{ N} \quad (33)$$

Plocha podélné podložky:  $S_p = 67398 \text{ mm}^2 \dots$  určeno dle Pro/Engineeru

$$p_{p2} = \frac{F_v}{S_p} = 0,25 \text{ MPa} \quad (34)$$

Napětí v ocelové pásu:

$$\sigma_p = \frac{2 \cdot F_N}{e \cdot t} = 83 \text{ MPa} \quad (35)$$

Bezpečnost:

$$k_p = \frac{Re_p}{\sigma_p} = 4,2 \quad (36)$$

$Re_p = 353MPa$  ... určeno dle materiálu 11 523.1 a konkrétního polotovaru - pásu

## 5.4 Umístění nádrže s rámem do vozidla

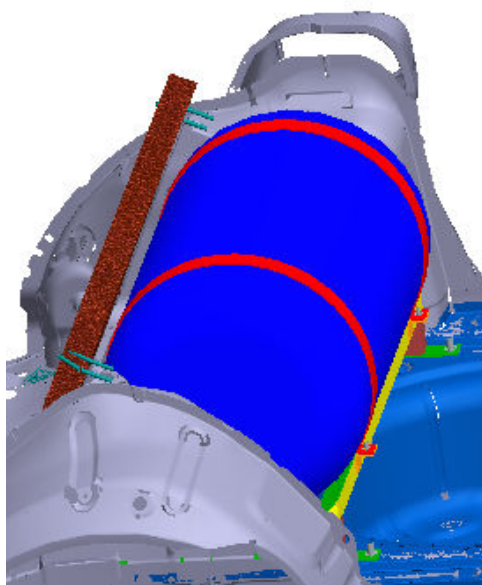
Jak už bylo uvedeno výše, rám je umístěn těsně za zadní sedadla a přichycen šrouby k podlaze zavazadlového prostoru. Ten jsem ještě v místě přichycení vyztužil ocelovými podložkami o rozměru 60 x 30 mm a tloušťky 5 mm, které jsou přivařeny zdola podlahy (viz obr. 25). Toto zesílení má zabránit vytržení šroubů z podlahy při případné nehodě. Šrouby jsou poté přivařeny zdola do vyvrtaných otvorů v ocelových podložkách.

Postup umístění těchto podložek jsem navrhl následovně: nejprve vyvrtat shora otvory, poté uchytit zdola podlahy ocelové podložky šroubem a maticí. Nyní tyto podložky přivařit k podlaze, v poslední fázi přivařit šrouby k ocelovým podložkám. Shora je na tyto šrouby usazen rám a uchycen pomocí matic s podložkami.

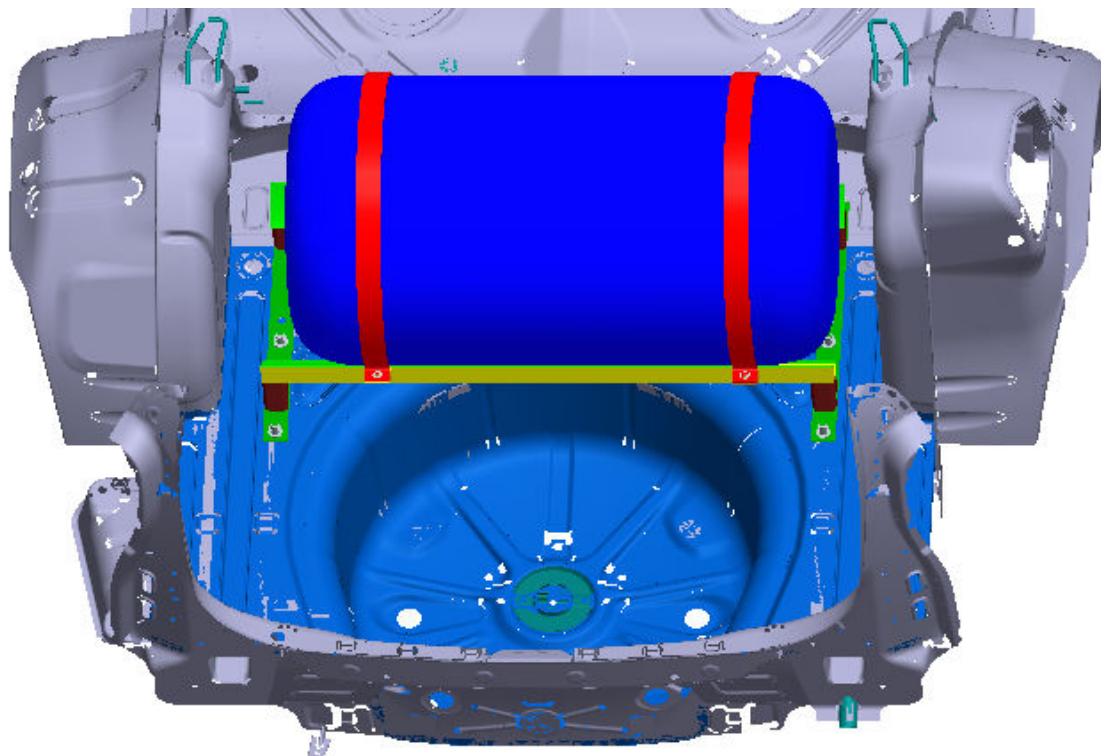
Nádrž není umístěná v rámu souměrně, nýbrž k pravé straně a to z důvodu, že nalevo budou umístěny vstupní a výstupní ventily a další armatury. Rám je konstruován tak, aby šlo rezervní kolo bez problémů vyjmout. Vše je zobrazeno i s modelem podlahy, který poskytla Škoda Auto a.s., na obr. 26 a 27.



Obr. 25 Vyztužení podložkami



Obr. 26 Zobrazení zadního sedadla



*Obr. 27 Zástavba v zavazadlovém prostoru*

## 5.5 Analýza rámu

### 5.5.1 Model, okrajové podmínky

Celý rám jsem namodeloval v programu Pro/Engineer a vlastní analýzu nasimuloval v nástavbě Pro/Mechanica. Výpočet jsem provedl v sestavě se všemi díly, pouze bez šroubů. Všechny díly mimo nádrže jsem uvažoval jako Solid, nádrž jako Shell pro zrychlení výpočtu. Tloušťku stěny jsem zvolil s ohledem, aby hmotnost nádrže vyšla dle skutečnosti, včetně jejího naplnění. Silové okrajové podmínky jsem zadal pomocí zrychlení ve 3 osách, v podélné ose 20g, v příčné ose automobilu 8g a svisle dolů působí gravitační zrychlení (viz příloha č.1). Geometrické okrajové podmínky jsem zadal na plochu pod podložky šroubů, zamezil jsem posuvy ve všech osách a rotace ve všech osách povolil (viz příloha č.1). Tento postup jsem konzultoval s vyučujícím na katedře textilních strojů.

### 5.5.2 Výsledky

Výpočet jsem provedl pomocí Multi - pass 6. polynom. Vyobrazené napětí je dle hypotézy HMMH, jednotky v legendě jsou MPa. Průběh napětí (viz příloha č.2) ukazuje,

že nejvyšší špičky jsou na hraně díry pro šroub. Takto vysoké napětí je způsobeno singularitou, která zde vzniká z důvodu ideálně ostré hrany, která bude ve skutečnosti trochu zaoblená, tím napětí bude nižší. Nejvyšší hodnoty napětí mimo singularity vycházejí kolem 500 MPa, to se dá považovat za dobrý výsledek z hlediska toho, že materiál 11 523.1 (polotovar - pás) má mez pevnosti v rozmezí 510 – 628 MPa. V mém případě srovnávám napětí s mezí pevnosti, protože po případné nehodě je rozhodující, aby nedošlo k prasknutí rámu, nějaké jeho menší deformace jsou povoleny.

Průběh posunutí (viz příloha č.3) zobrazuje, že maximum se vyskytuje v horní části nádrže a jeho hodnota činí 1,1 mm. Tento výsledek neodpovídá úplně reálné skutečnosti, protože v mém případě není nádrž pevně spojena s rámem ani s pásy, jak to uvažuje Pro/Mechanica.

## 6. Odpařování vodíku

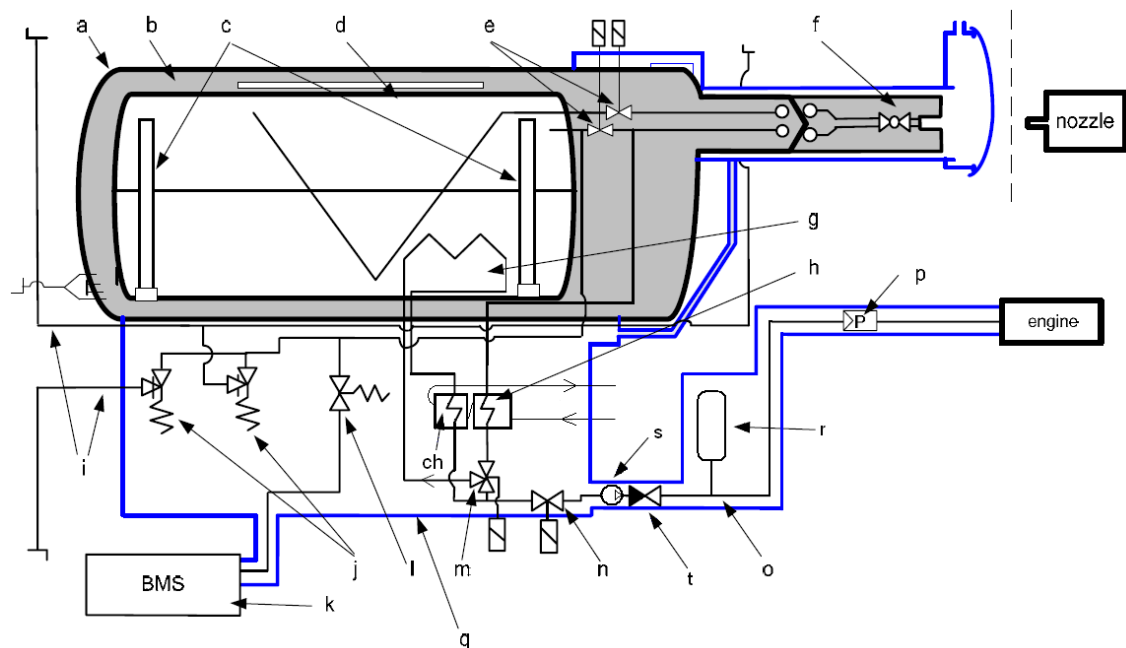
### 6.1 Výběr varianty uskladnění a odpařování vodíku

Odpaření kapalného vodíku a jeho následné stlačení na 10 MPa je velmi obtížné. Každá ze tří možných variant má své výhody a nevýhody, jako nejvhodnější přichází v úvahu varianta (3.2.2 nízkotlaká nádoba s kompresorem). I když má tento způsob nevýhodu spočívající v tom, že není na trhu vhodný vodíkový kompresor. Pro případnou realizaci tohoto řešení bude nutno vodíkový membránový kompresor zkonstruovat. V zadání diplomové práce není uveden návrh kompresoru, ale pouze způsob regulace tlaku na požadovanou hodnotu. Další dvě zbývající varianty mají ještě větší nevýhody, které jsou téměř neřešitelné.

Varianta (3.2.1 Nízkotlaká nádoba s dvojčinnou tlakovou cestou) je příliš složitá a toto zařízení má velké rozměry. Velký problém zde také činí odpadní vodík vypouštěný do atmosféry. Nejvhodnějším využitím tohoto způsobu je stacionární zařízení, používá ho např. firma Ferox Chart Děčín.

Varianta (2.3.3 Vysokotlaká nádoba) - v tomto případě je vodík uskladněn pod vysokým tlakem, což přináší nebezpečí s tím spojené, ale je zde téměř nemožné navrhnout výměník tepla. Dodání tepla se děje při vysokém tlaku, z čehož vyplývá nutnost instalace velmi malých průměrů trubek ve výměníku, a tudíž výrazně klesá součinitel přestupu tepla vodíku. Tyto zřetelně malé průměry vedení jsou nutné pro zachování optimální rychlosti proudění vodíku.

### 6.1.1 Schéma systému odpařování a regulace



Obr. 28 Kryogenní nádrž s příslušenstvím

#### Legenda:

- |                                  |                              |
|----------------------------------|------------------------------|
| a...Vnější plášť                 | k...Odpařovací systém řízení |
| b...Superizolace                 | l...Odpařovací ventil        |
| c...Senzory na měření hladiny    | m...Vnitřní řídicí ventil    |
| d...Vnitřní nádrž                | n... Uzavírací ventil        |
| e...Kryogenní uzavírací ventily  | o...Vedení paliva k motoru   |
| f...Plnicí hrdlo                 | p...Redukční ventil          |
| g...Vnitřní trubkový výměník     | q...Plynotěsná schránka      |
| h...Hlavní vodní výměník         | r...Vzdušník                 |
| ch...Vedlejší vodní výměník      | s...Vodíkový kompresor       |
| i...Bezpečnostní vedení          | t...Jednosměrný ventil       |
| j...Pomocné bezpečnostní ventily |                              |

### 6.1.2 Popis kryogenní nádrže, systému odpařování a regulace

Tento kryogenní systém se skládá z dvou hlavních podsystémů. Prvním je kryogenní nádrž, která je tvořena ze dvou nerezových tanků, mezi kterými je vakuum a na vnitřním tanku je namotána superizolace. Druhým podsystémem je plynotěsná schránka, která obklopuje všechny ostatní součásti.



K plnění slouží zvláštní kryogenní tryska, která je připojená k plnicímu zařízení. Spojení musí být dostatečně tepelně izolováno. Elektrické spojení mezi vodíkovou řídicí jednotkou (HCU) a plnicím čerpadlem zajišťuje bezpečné plnění, které se zastaví v případě, že snímače hladiny zjistí maximální hladinu paliva. Během plnění jsou oba kryogenní ventily (e) otevřeny. Plyný vodík dopravený s kapalným nebo vyprodukovaný vypařováním během plnění je vrácen čerpací stanici přes přívodní vedení.

Hlavní funkcí systému je dodávat plyný vodík o teplotě minimálně  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  a tlaku  $10\text{ MPa}$  k motoru. V nádrži je vodík uskladněn v kapalném stavu, nad touto hladinou je část vodíku v plyném skupenství, které se odebírá. Při nastartování motoru je třeba nejdříve použít benzín, aby se ohřála voda v chladiči a mohla začít proudit do výměníku. Až poté je možno přepnout na vodík, otevřít kryogenní ventil (e) a uzavírací ventil (n), vodík tím začne proudit do výměníku a ohřívat se na teplotu  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Poté proudí do membránového kompresoru, kde je stlačen na tlak převyšující hodnotu  $10\text{ MPa}$ . Za kompresorem je jednosměrný ventil a poté vzdušník, který zajišťuje rovnoměrnost dodávky vodíku. Ten také umožní při snížení odběru vodíku a naplněném vzdušníku, aby se kompresor vždy na chvíli vypnul. Přesný tlak  $10\text{ MPa}$ , který je požadován na vstupu do motoru, zajišťuje redukční ventil těsně před vstupem do motoru. Při delším odběru začne klesat tlak v nádrži, proto je třeba část ohřátého vodíku odklonit vnitřním řídicím ventilem (m) do výměníku (g) v nádrži, ten zajistí odpařování dalšího vodíku a nárůst tlaku v nádrži. Vodík, který prošel výměníkem v nádrži se ochladí, proto proudí opět do vodního výměníku, kde se ohřeje na požadovanou teplotu  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , poté je vrácen do hlavního toku.

## 6.2 Výpočty armatur, systému odpařování a výměníku

### 6.2.1 Průtok vodíku

Uvažuji účinnost motoru  $33,3\%$ , z toho vyplývá maximální potřebný výkon v palivu:

$$P' = 177\text{ kW}$$

Maximální potřebný průtok vodíku při maximálním výkonu motoru:

$$\dot{m} = \frac{P'}{Q_{LH_2}} \cdot 3600 = 5,31\text{ kg/h} \quad (37)$$

$$Q_{LH_2} = 120\text{ MJ/kg} \dots \text{výhřevnost vodíku}$$

## 6.2.2 Průměry potrubí

**Na výstupu z nádrže:**

**Parametry vodíku:**

měrná plynová konstanta:  $r = 4,116 \text{ kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}$

rychlost proudění vodíku v potrubí:  $v_{LH2} = 20 \text{ m} / \text{s}$  (určeno po dohodě s konzultantem)

teplota:  $T_1 = 20 \text{ K}$

absolutní tlak:  $p = 0,5 \text{ MPa}$

Měrný objem:

$$v_1 = \frac{r \cdot T_1}{p} = 0,165 \text{ m}^3 / \text{kg} \quad (38)$$

Objemový průtok:

$$\dot{V}_1 = \frac{\dot{m} v_1}{3600} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} \quad (39)$$

Průměr potrubí:

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_1}{\pi \cdot v_{LH2}}} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \Rightarrow 4 \text{ mm} \quad (40)$$

**Za výměníkem tepla:**

**Parametry vodíku:**

měrná plynová konstanta:  $r = 4,116 \text{ kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}$

rychlost proudění vodíku v potrubí:  $v_{LH2} = 20 \text{ m} / \text{s}$  (určeno po dohodě s konzultantem)

teplota:  $T_2 = 173 \text{ K}$

absolutní tlak:  $p = 0,5 \text{ MPa}$

Měrný objem:

$$v_2 = \frac{r \cdot T_2}{p} = 1,424 \text{ m}^3 / \text{kg} \quad (41)$$

Objemový průtok:

$$\dot{V}_2 = \frac{\dot{m} v_2}{3600} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s} \quad (42)$$

Průměr potrubí:

$$D_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_2}{\pi \cdot v_{LH2}}} = 11,6 \cdot 10^{-3} \text{ m} \Rightarrow 12 \text{ mm} \quad (43)$$

## 6.2.3 Potřebný výkon na ohřátí vodíku

### Výkon potřebný na odpařování vodíku v nádrži:

Skupenské teplo varu vodíku  $h_{H_2} = 444,6 \text{ kJ/kg}$  (určeno dle  $T_1 = 20 \text{ K}$ ,  $p = 0,5 \text{ MPa}$ )

$$Q_1 = \frac{h_{H_2} \cdot \dot{m}}{3600} = 656 \text{ W} \quad (44)$$

### Výkon potřebný na ohřátí vodíku ve výměníku na teplotu $-100^\circ\text{C}$

$$\Delta t = T_2 - T_1 = 153^\circ\text{C} \quad (45)$$

Střední teplota vodíku ve výměníku:

$$T_s = \frac{T_1 + T_2}{2} = 96,5 \text{ K} \quad (46)$$

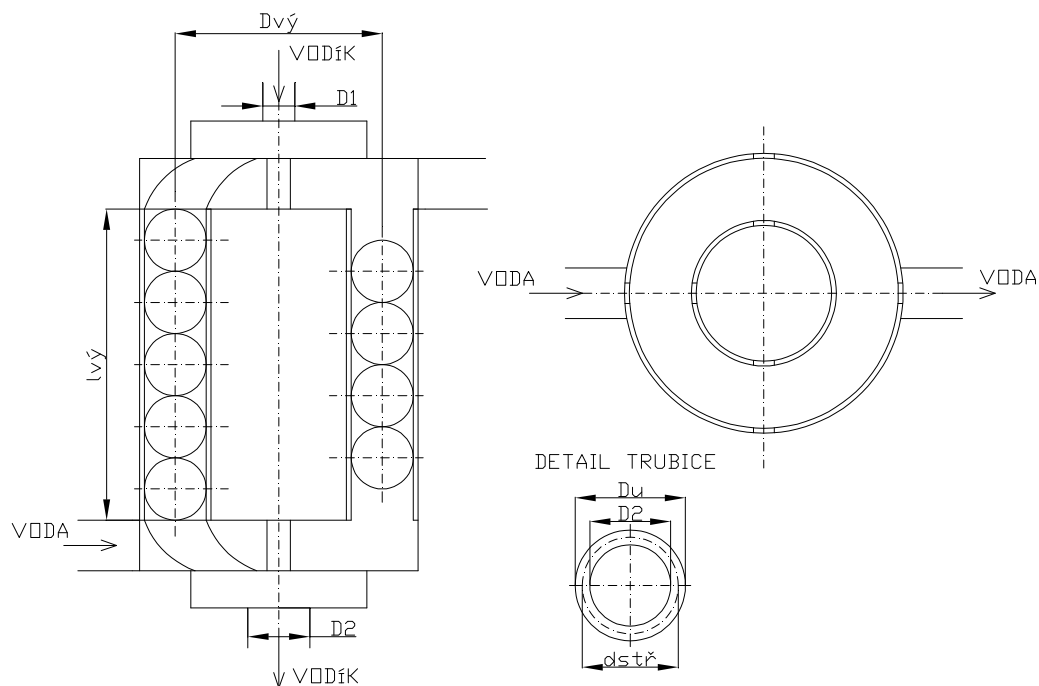
Měrná tepelná kapacita vodíku  $c_{pH_2} = 11 \text{ kJ/kg.K}$  (určeno dle  $T_s = 96,5 \text{ K}$ ,  $p = 0,5 \text{ MPa}$ )

$$Q_2 = \frac{c_{pH_2} \cdot \Delta t \cdot \dot{m}}{3600} = 2482 \text{ W} \quad (47)$$

## 6.2.4 Návrh výměníku tepla

Výměník tepla slouží k ohřátí vodíku z teploty  $-253^\circ\text{C}$  proudícího z nádrže na teplotu  $-100^\circ\text{C}$ , při které je možné jeho stlačení v kompresoru. Navrhl jsem hlavní vodní výměník (h), ostatní dva výměníky jsem už nenavrhoval, výpočet by byl obdobný. Pouze u vnitřního trubkového výměníku (g) by se lišil výpočet součinitele přestupu tepla vodíku. Nejednalo by se o přestup tepla při nuceném proudění tekutiny, nýbrž o přestup tepla při bublinkovém varu na teplosměnných plochách ponořených do velkého objemu kapaliny.

Hlavní vodní výměník jsem navrhl formou protiproudového uspořádání. Konstrukce je následující: na obvodu trubky jsou připájeny po  $90^\circ$  čtyři prokládky tloušťky  $1 \text{ mm}$ , na kterých je navinuta trubice, ve které proudí vodík. Ta je uložena ve větší trubce a opět na prokládkách (viz obr. 29). Trubice je zhotovena z mědi pro její dobrou tepelnou vodivost a odolnost proti nízkým teplotám, ostatní součásti jsou z nerez ocele. Vnitřní průměr trubice jsem zvolil rovnocenně s vedením na výstupu z výměníku, všechny hodnoty při výpočtu jsem přepočítal na střední hodnoty v polovině výměníku.



Obr. 29 Výměník

#### 6.2.4.1 Součinitel přestupu tepla vodíku

Střední rychlost proudění vodíku ve výměníku:

$$\frac{\pi \cdot D_2^2}{4} = \frac{\dot{m} \cdot r \cdot T_s}{p \cdot w_{H_2}} \Rightarrow w_{H_2} = 10,7 \text{ m/s} \quad (48)$$

Střední hustota vodíku ve výměníku:

$$\rho_{H_2} = \frac{p}{r \cdot T_s} = 1,22 \text{ kg/m}^3 \quad (49)$$

Dynamická viskozita vodíku:  $\eta_{H_2} = 8,35 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  (určeno dle tabulek)

Střední kinematická viskozita vodíku:

$$\nu_{H_2} = \frac{\eta_{H_2}}{\rho_{H_2}} = 6,84 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (50)$$

Kritériální rovnice určené pro přestup tepla při turbulentním proudění tekutiny v trubce kruhového průřezu a rozdílných teplotách stěny trubky a proudícího média:

Reynoldsovo číslo:

$$\text{Re} = \frac{w_{H_2} \cdot D_2}{\nu_{H_2}} = 1,88 \cdot 10^4 \quad (51)$$

Tepelná vodivost vodíku:  $\lambda_{H_2} = 0,044 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (určeno dle  $T_s = 96,5 \text{ K}$ ,  $p = 0,5 \text{ MPa}$ )

Prandtlovo číslo:

$$Pr = \frac{c_{pH2} \cdot \rho_{H2} \cdot \nu_{H2}}{\lambda_{H2}} = 2,09 \quad (52)$$

Nusseltovo číslo:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left( \frac{T_{st}}{T_s} \right)^{-0,55} = 39,4 \quad (53)$$

$T_{st} = 359K$  ...střední teplota stěny trubky (vypočteno zpětně)

Součinitel přestupu tepla vodíku:

$$\alpha_{H2} = \frac{Nu \cdot \lambda_{H2}}{D_2} = 144W / m^2 \cdot K \quad (54)$$

#### 6.2.4.2 Součinitel přestupu tepla vody

Průtok vody výměníkem uvažuji 10 % z celkového množství vody protékající chladičem.

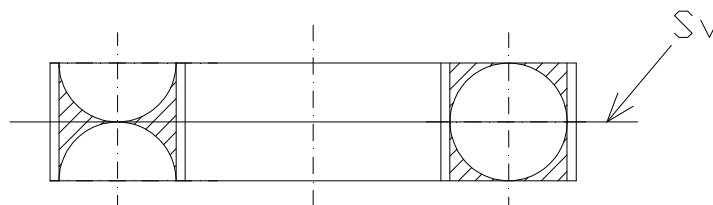
Průtok chladičem jsem vypočetl z toho, že uvažuji 1/3 teoretického výkonu ( $P_{CH} = 59kW$ ) z celkového výkonu ( $P' = 177kW$ ) přivedeného v palivu do motoru chlazeného chladičem. Pokles teploty v chladiči počítám z teploty  $t_{CH1} = 97^\circ C$  na  $t_{CH2} = 90^\circ C \Rightarrow \Delta t_{CH} = 7^\circ C$ , měrná tepelná kapacita vody při střední teplotě  $93,5^\circ C$  je  $c_{pCH} = 4208J / kg \cdot K$ .

Průtok chladičem:

$$\dot{m}_{CH} = \frac{P_{CH}}{c_{pCH} \cdot \Delta t_{CH}} = 2kg / s \quad (55)$$

Z toho 10% do výměníku činí:  $\dot{m}_v = 0,2kg / s$

Dle rozměrů výměníku (viz obr. 30), střední průřez, kde proudí voda:  $S_v = 720mm^2$



Obr. 30 Řez výměníkem

Rychlost proudění vody ve výměníku:

$$w_V = \frac{n \cdot \dot{V}_V}{\rho_{vo} \cdot S_V} = 0,28 \text{ m/s} \quad (56)$$

$\rho_{vo} = 1000 \text{ kg/m}^3$  ... hustota vody

Kinematická viskozita vody:

$$\nu_{vo} = 0,312 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (\text{určeno dle } t_v = 94,5^\circ\text{C})$$

Střední teplota vody ve výměníku (vypočteno zpětně po určení jednotlivých veličin):

$$t_v = \frac{t_{1vo} + t_{2vo}}{2} = 94,5^\circ\text{C} \quad (57)$$

Kritériální rovnice určené pro přestup tepla při příčném obtékání válce:

Reynoldsovo číslo:

$$\text{Re} = \frac{w_V \cdot D_u}{\nu_{vo}} = 1,26 \cdot 10^4 \quad (58)$$

$D_u = 14 \text{ mm}$  ... vnější průměr trubice ve výměníku

Tepelná vodivost vody:  $\lambda_{vo} = 0,679 \text{ W/m.K}$  (určeno dle  $t_v = 94,5^\circ\text{C}$ )

Měrná tepelná kapacita vody:  $c_{pvo} = 4209 \text{ J/kg.K}$  (určeno dle  $t_v = 94,5^\circ\text{C}$ )

Prandtlovo číslo:

$$\text{Pr} = \frac{c_{pvo} \cdot \rho_{vo} \cdot \nu_{vo}}{\lambda_{vo}} = 1,9 \quad (59)$$

Nusseltovo číslo:

$$\text{Nu} = 0,193 \cdot \text{Re}^{0,618} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}} = 81,7 \quad (60)$$

Součinitel přestupu tepla vody:

$$\alpha_{vo} = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{vo}}{D_u} = 3965 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (61)$$

#### 6.2.4.3 Součinitel prostupu tepla výměníku

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{H2}} + \frac{s}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{vo}}} = 139 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (62)$$

$s = 1 \text{ mm}$  ... tloušťka stěny trubice výměníku

$\lambda_m = 400 \text{ W/m.K}$  ... tepelná vodivost mědi při teplotě  $T_{st} = 359 \text{ K}$

#### 6.2.4.4 Rozměry výměníku

Návrh protiproudového výměníku tepla:

Teplota vodíku vstupující do výměníku:  $t_{1H2} = -253\text{ °C}$

Teplota vodíku vystupující z výměníku:  $t_{2H2} = -100\text{ °C}$

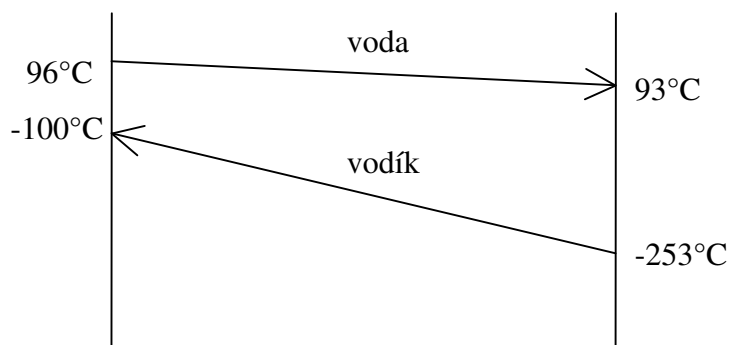
Teplota vody vstupující do výměníku:  $t_{1vo} = 96\text{ °C}$

Rovnice tepelné bilance:

$$\dot{m}_v \cdot c_{pvo} \cdot (t_{1vo} - t_{2vo}) = \dot{m}_c \cdot c_{pH2} \cdot (t_{1H2} - t_{2H2}) \Rightarrow t_{2vo} = 93\text{ °C} \quad (63)$$

Tepelný spád výměníku:

$$\Delta \bar{t} = \frac{(t_{1vo} - t_{2H2}) - (t_{2vo} - t_{1H2})}{\ln \frac{t_{1vo} - t_{2H2}}{t_{2vo} - t_{1H2}}} = 264\text{ °C} \quad (64)$$



Obr. 31 Diagram výměníku

Tepelný tok výměníkem:

$$q = \frac{2 \cdot \pi \left( \frac{t_{1vo} + t_{2vo}}{2} - \frac{t_{1H2} + t_{2H2}}{2} \right)}{\frac{1}{\frac{D_2}{2} \cdot \alpha_{H2}} + \frac{1}{\lambda_m \ln \frac{D_u}{D_2}} + \frac{1}{\frac{D_u}{2} \cdot \alpha_{vo}}} = 1426\text{ W / m} \quad (65)$$

Teplota vnitřní stěny trubice výměníku:

$$t_{s1} = \frac{t_{1H2} + t_{2H2}}{2} + \frac{q}{\alpha_{H2} \cdot \pi \cdot D_2} = 86,2\text{ °C} \quad (66)$$

Teplota vnější stěny trubice výměníku:

$$t_{s2} = \frac{t_{1vo} + t_{2vo}}{2} - \frac{q}{\alpha_{vo} \cdot \pi \cdot D_u} = 86,3\text{ °C} \Rightarrow \text{nehrozí zamrznutí vody ve výměníku} \quad (67)$$

Plocha trubice výměníku:

$$S_{vy} = \frac{Q_2}{K \cdot \Delta \bar{t}} = 0,0676\text{ m}^2 \quad (68)$$

Délka trubice výměníku:

$$l_t = \frac{S_{vy}}{\pi \cdot d_{stř}} \cdot k_{vy} = 2,5m \quad (69)$$

$d_{stř} = 13mm$  ...střední průměr trubice výměníku

$k_{vy} = 1,5$  ...součinitel bezpečnosti výměníku

Počet závitů trubice ve výměníku:

$$n = \frac{l_t}{\pi \cdot D_{vy}} = 9,7 \Rightarrow 17,2 \quad (70)$$

$D_{vy} = 46mm$  ...roztečný průměr trubice výměníku

Délka výměníku:

$$l_{vy} = D_u \cdot n = 240,6mm \quad (71)$$

## 7. Bezpečnostní parametry

### 7.1 Bezpečnost používání vodíku

Vodík je považován za nebezpečný, hořlavý a výbušný plyn. To je pravda, ale takové vlastnosti mají všechna paliva - benzín, nafta, zemní plyn, letecký benzín... Hlavní nevýhodou vodíku oproti ostatním palivům je jeho velmi široké rozpětí hořlavosti (4 - 76 %) a výbušnosti (15 - 59 %) ve směsi se vzduchem. V porovnání s ostatními palivy má však vodík také své přednosti. Oproti benzínu má dolní mez hořlavosti vyšší, není těžší než vzduch jako např. propan - butan. Vodík dále není toxický ani korozivní, při přepravě, distribuci nebo plnění nemůže dojít k ekologické havárii jako u ropy a jejích derivátů. Spalovací vlastnosti vodíku a jeho „špatná pověst“ nutí všechny, kteří s vodíkem pracují, k daleko přísnějším bezpečnostním opatřením, než která jsou prováděna u klasických paliv. Lze tak konstatovat, že používání vodíku při dodržování předpisů je bezpečné.

### 7.2 Vlastnosti vodíku při provozu

Kapalný vodík má tu vlastnost, že se velmi rychle vypaří, neboť bod varu je extrémně nízký. Malé molekuly vodíku zvyšují pravděpodobnost jeho úniku netěsnostmi. Dále mají za následek velmi vysokou rozptylnost, tím dojde k jeho velmi rychlému zředění, zvláště ve venkovním prostředí, a z toho důvodu má velmi omezenou



oblast hořlavosti. Vodík je výrazně lehčí než vzduch, což způsobuje jeho rychlý únik do ovzduší. Z tohoto důvodu mají automobily s vodíkovými nádržemi zakázáno vjíždět do podzemních garáží. Proto i při rozliti kapalného vodíku pomine nebezpečí vznícení již krátce po vypaření. Oproti tomu uniklý benzín či nafta se vypařují pomalu, čímž se prodlužuje délka trvání nebezpečí požáru.



*Obr. 32 Simulace proražení vodíkové nádrže [1]*

Při malých netěsnostech rozptýl vodíku ve vzduchu ještě podpoří přítomnost proudu vzduchu (z nepatrného okolního větru, z pohybu vozidla nebo z větráku chladiče), čímž klesá nebezpečí požáru.

Při úniku malými štěrbinami z vysokého tlaku (bude-li vodík škrcen), stoupá jeho teplota, hrozí proto popálení. Tento jev způsobuje (na rozdíl od ostatních plynů) záporný Joule - Thomsonův koeficient.

### **7.3 Bezpečnost kryogenní nádrže a palivové instalace**

Hlavním bezpečnostním zařízením palivové instalace je vodíková řídicí jednotka (HCU) používaná u vozu BMW Hydrogen 7. Kvůli jejím vysokým nárokům na bezpečnost byl hardware a software vyvinutý podle IEC 61508 (2002). Ta prostřednictvím různých senzorů měří hodnoty (teploty, tlaku, atd.).

Velmi důležitým prvkem bezpečnosti je plynotěsná schránka (q), která obklopuje všechny součásti (armatury, výměník tepla, kompresor, elektronická zařízení). Tato plynotěsná schránka slouží k zachycení případně unikajícího vodíku. Únik by byl okamžitě zaznamenán příslušným senzorem, který dá signál HCU. Tento systém okamžitě uzavře ventily (e) a vyšle nouzový signál na displej řidiče. Čidla

vodíku jsou také umístěna u prostoru pro posádku vozu, protože člověk není schopen zaznamenat jeho přítomnost.

Při uskladnění  $\text{LH}_2$  nesmí teplota stoupnout nad teplotu 20 K, při delším stání se neustálým přívodem tepla do nádrže začne vodík odpařovat, a tím stoupne tlak v nádrži. Nádrž je dimenzována na maximální tlak 1,6 MPa, pracovní tlak je počítán do 1,38 MPa. Pokud tlak uvnitř nádrže stoupne nad 1,38 MPa otevře se ventil (l) a vodík začne unikat do atmosféry přes zařízení BMS. Zde se vodík převádí na vodní páru za pomoci atmosférického kyslíku, bez nutnosti dalšího zdroje energie. Pokud by došlo k poruše BMS, systém HCU to okamžitě vyhodnotí a otevře bezpečnostní ventily (j), kterými by byl vodík vypuštěn do atmosféry.

Dalším nebezpečím skýtá náhlá ztráta vakua mezi vnitřním a vnějším pláštěm. Ta může nastat po poškození při havárii, což může vést k masivnímu přestupu tepla z okolí k vnitřní nádrži, a následkem toho k dramatickému zvýšení tlaku uvnitř nádrže. V té chvíli by mohlo dojít k protržení nádrže, proto musí být vodík okamžitě odpuštěn. Zařízení BMS by takové velké množství nedokázalo najednou zpracovat, proto by byl vodík vypuštěn do atmosféry dvěma bezpečnostní ventily (j).

Neméně důležitým bezpečnostním opatřením je, že v případě nehody dají nárazová čidla v několika tisícinách sekundy signál HCU, a tím dojde k okamžitému uzavření ventilů (e). Tento úkon předejde možnému úniku vodíku v případě poškození přívodního vedení.

## 7.4 Bezpečnostní opatření při práci s vodíkem

Striktní dodržení bezpečnostních opatření je důležité při práci s  $\text{LH}_2$  palivovým systémem.

- Používat pouze zařízení určené pro tento výrobek pro daný tlak a teplotu
- Zamezit zpětnému proudění plynu do nádoby
- Zamezit vniknutí vody do nádoby
- Neumísťovat do blízkosti zdrojů zapálení, zamezit vzniku elektrostatického náboje
- Zajistit dostatečné větrání místnosti
- Při práci nekouřit
- Vždy nosit ochranné pomůcky jako jsou: brýle, rukavice, vhodný pracovní oděv a obuv (ohnivzdorný oděv je doporučený)

## 8. Závěr

Pohon vozidel zkapalněným vodíkem je ve srovnání s běžným pohonem na benzín nebo naftu na počátku svého vývoje. Nedokáže proto v mnohých směrech běžným pohonům konkurovat. Mezi jeho hlavní nevýhody patří vyšší pořizovací cena samotného vodíku, následné zkapalnění je také dosti energeticky nákladné. Dále velmi řídká síť čerpacích stanic, nebezpečí úniku a výbuchu při případné havárii.

Na druhou stranu má pohon na zkapalněný vodík oproti běžným palivům své výhody. Patří sem téměř nulové emise výfukových plynů při spalování vodíku, nezávislost na stále ubývajících fosilních palivech.

V diplomové práci jsem vyřešil zástavbu kryogenní nádrže ve vozidle Škoda Octavia, úpravu dílu podlahy pro připevnění rámu nádrže. Dále způsob odpařování vodíku, návrh výměníku tepla pro ohřev vodíku a způsob získání tlaku 10 MPa na vstupu do motoru. Dále jsem navrhl bezpečnostní parametry palivové instalace, které jsou na patřičné úrovni a poskytují vysoký stupeň bezpečí.

S přestavbou na zkapalněný vodík má smysl se zabývat pouze u automobilů, které budou denně v provozu, např. vozy taxi. Tato skutečnost je zapříčiněna permanentním přívodem tepla do nádrže, čímž dochází k odpařování vodíku. Z důvodu kratšího dojezdu na vodík a velmi řídké sítě čerpacích stanic je nutno zachovat v plném rozsahu také původní benzínový pohon, čímž se prodlouží celkový dojezd. Nevýhodou takto přestaveného vozu je zmenšení zavazadlového prostoru, zvýšení celkové hmotnosti automobilu a v neposlední řadě také finanční náklady na samotnou přestavbu.

Při případné realizaci tohoto řešení bude nutné navrhnout vodíkový kompresor. S tím také souvisí výpočet teploty vodíku po stlačení daným kompresorem. To nebylo předmětem mé práce, protože neznám přesnou konstrukci kompresoru, počet jeho stupňů, nebo možnost chlazení. Co se týká elektromagnetických uzavíracích ventilů, ty jsem nenavrhoval, protože se žádné vhodné pro tento specifický případ sériově nevyrábějí a bylo by nutné je speciálně vyrobit.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HORÁK, B., KOZIOREK, J., KOPŘIVA, M., PAPOUŠEK, M., SLANINA, Z.: Studie pohonu mobilního prostředku palivovým článkem. FEI VŠB-TU Ostrava 2005
- [2] DANER, S., FUERST, S.: H<sub>2</sub> - Storage in the new BMW Hydrogen 7 series - a safe way to a clean future. BMW AG, Germany 2006
- [3] KUTATELADZE, S. S., BORISANSKIJ, V. M., HIBŠ, M.: Příručka sdílení tepla. Praha, SNTL 1962
- [4] LEINVEBER, J., ŘASA, J., VÁVRA, P.: Strojnické tabulky. Praha, Scientia 1998
- [5] FIALA, J., BEBR, A., MATOŠKA, Z.: Strojnické tabulky, sv.1., Materiály pro strojnickou výrobu. Praha, SNTL 1987
- [6] FIALOVÁ, M., PETŘÍKOVÁ, M., ŠILAR, P., ZAPLATÍLEK, V.: Termomechanika, Tabulky. Liberec 1999
- [7] Předpis EHK 110
- [8] Bezpečnost používání vodíku:  
[http://www.energetik.cz/hlavni3.html?m1=/clanky/pl\\_2000\\_56\\_4.html](http://www.energetik.cz/hlavni3.html?m1=/clanky/pl_2000_56_4.html)
- [9] Obrázky uskladnění vodíku:  
<http://si.vega.cz/clanky/vodikove-hospodarstvi/>
- [10] Technické parametry automobilu:  
<http://www.skoda-auto.com/cze/>
- [11] Rozměry automobilu:  
<http://skoda.panda.cz/clanek.php3?id=428>
- [12] BMW Hydrogen 7:  
<http://automix.centrum.cz/novinky/clanek.phtml?id=8668>
- [13] Obrázky BMW Hydrogen 7:  
[http://auto.idnes.cz/auto-za-28-milionu-z-vyfuku-jde-jen-para-dhp-/automoto.asp?c=A070118\\_140556\\_automoto\\_fdv](http://auto.idnes.cz/auto-za-28-milionu-z-vyfuku-jde-jen-para-dhp-/automoto.asp?c=A070118_140556_automoto_fdv)

## **PŘÍLOHY**

# SEZNAM PŘÍLOH

č.1 Okrajové podmínky

č.2 Průběh napětí

č.3 Průběh posunutí

č.4 Materiálový list

KVM – DP – 527 – 01    NADRZ S RAMEM

KVM – DP – 527 – 02    RAM

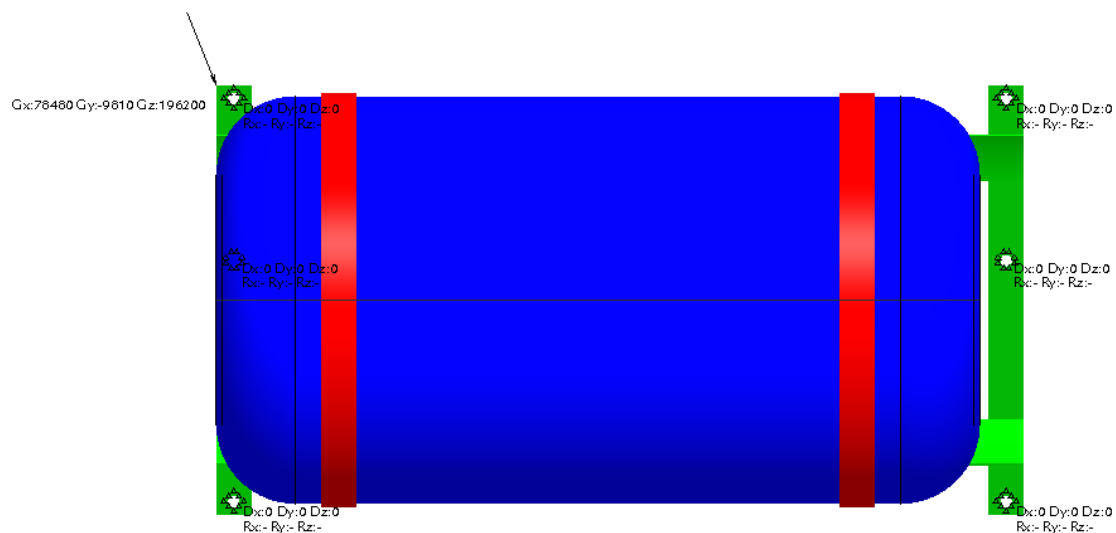
KVM – DP – 527 – 03    UPRAVA SVARENCE PODLAHY

KVM – DP – 527 – 04    OCELOVY PAS

KVM – DP – 527 – 05    PODLOZKA

CD ROM

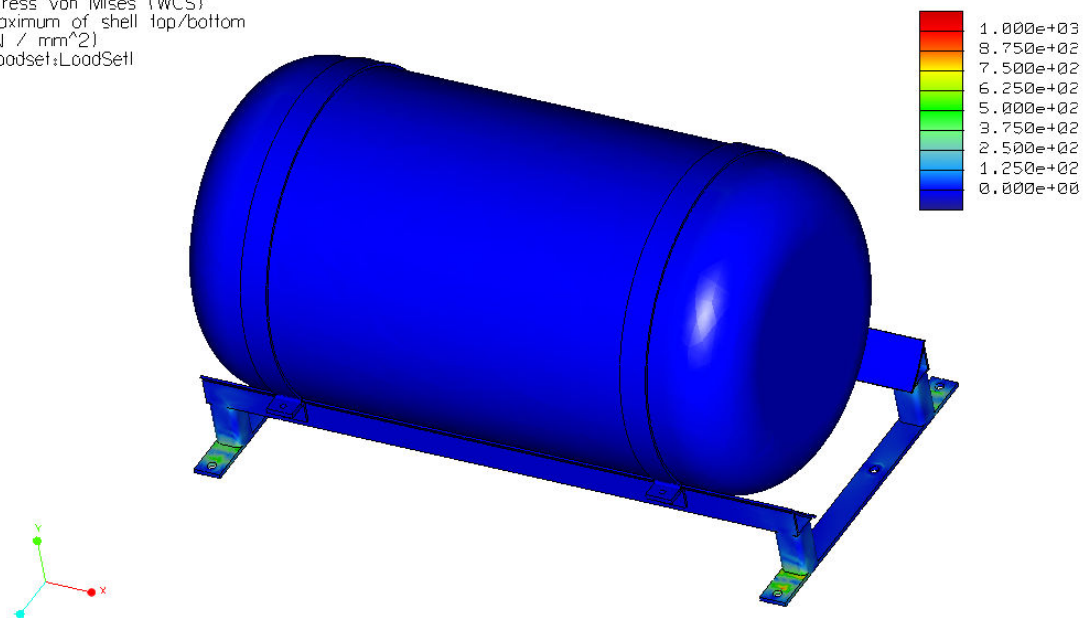
## PŘÍLOHA č.1



*Okrajové podmínky*

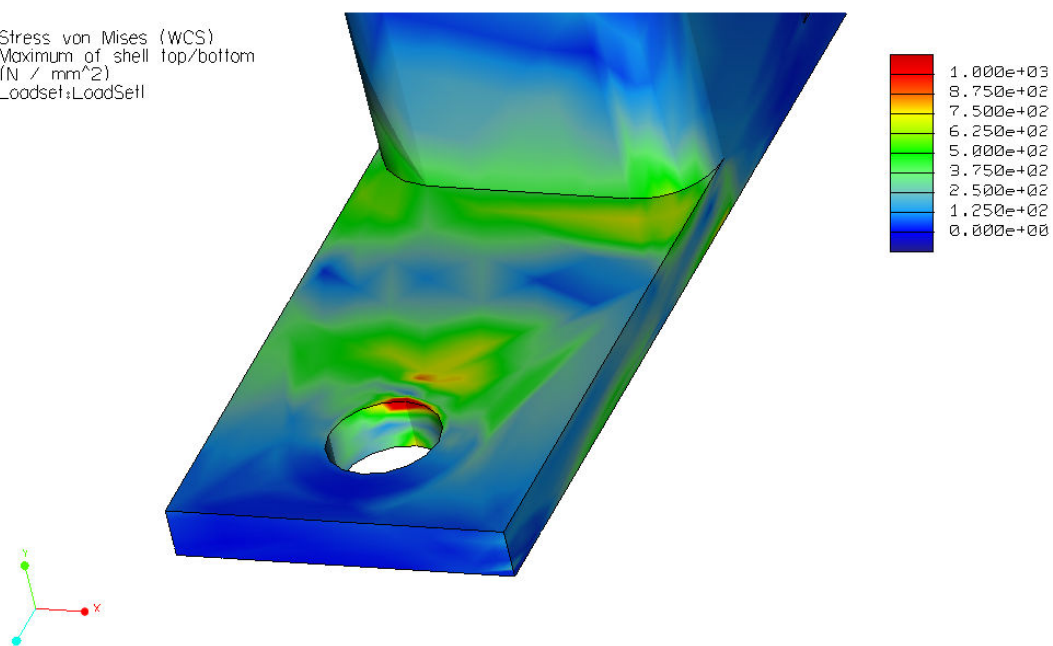
## PŘÍLOHA č.2

Stress von Mises (WCS)  
Maximum of shell top/bottom  
(N / mm<sup>2</sup>)  
Loadset:LoadSet1



*Průběh napětí – celý rám*

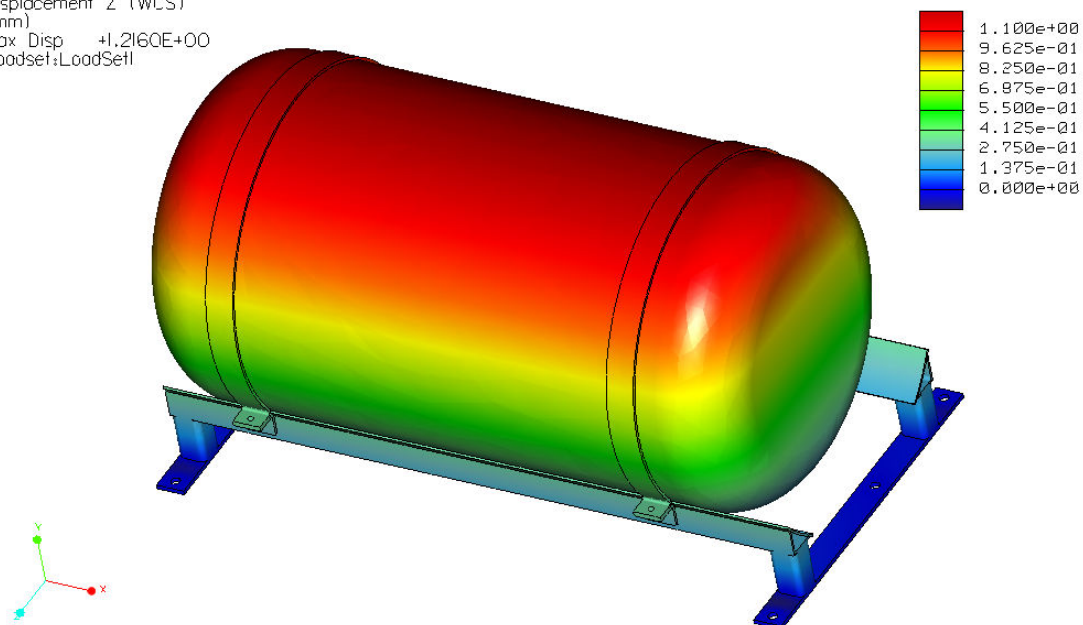
Stress von Mises (WCS)  
Maximum of shell top/bottom  
(N / mm<sup>2</sup>)  
LoadSet:LoadSet1



*Průběh napětí – detail*

### PŘÍLOHA č.3

Displacement Z (WCS)  
(mm)  
Max Disp +1.2160E+00  
LoadSet:LoadSet1



*Průběh posunutí*



## PŘÍLOHA č.4

Materiálový list



**11 523.1** (nelegovaná konstrukční ocel)

### Porovnání se zahraničním materiálem

ČR	W.-Nr.	ISO	EURO	USA	BS	JIS
<b>11 523</b>	1.0570	Fe510	Fe510	Gr. 15180	50/35HR	SKD6
<b>ČSN 41 1523</b>		ISO 630-80	EN 10025-90			

### Chemické složení

Jakost	C	Si	Mn	P	S	N
<b>11 523</b>	0,2	0,55	1,6	0,04	0,04	0,009

### Tepelné zpracování

<b>normalizační žíhání</b>	870 - 900 °C	ochlazovat na vzduchu
<b>žíhání na měkko</b>	680 - 710 °C	zvolna ochlazovat
<b>žíhání ke snížení pnutí</b>	600 - 650 °C	zvolna ochlazovat
<b>popouštění</b>	670 - 700 °C	ochlazovat na vzduchu
<b>tvářitelnost</b>	800 - 1150 °C	třída tvářitelnosti za tepla 1

### Mechanické vlastnosti

<b>mez pevnosti R<sub>m</sub> (MPa)</b>	450 - 630
<b>mez kluzu R<sub>eH</sub> (MPa) min</b>	275

### Doporučený přídatný materiál na svařování

<b>el. obloukem ručně</b>	E-B 121
---------------------------	---------

Lentus, spol. s r. o.  
Svobodín 31  
294 04 Dolní Bousov  
tel. fax: 326 396 609

Firma provádí nákup, opracování za výhodnou cenu a prodej nástrojové, ušlechtilé, rychlořezné, vysoce legované, cementační, pevnostní, konstrukční a kované oceli, určené v obrobeném broušeném stavu pro výrobu nástrojů, forem, raznic, přípravků a strojních dílů.

